LE LÉMAN



Kümmerly frères, Berne.

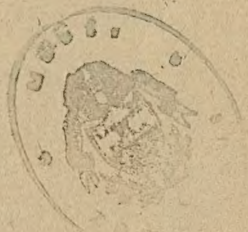
LE LÉMAN. Pl. I. Echelle 1 : 350 000.

Réduction de la carte suisse, autorisée par le Bureau topographique fédéral.

F.-A. FOREL

LE LÉMAN

MONOGRAPHIE LIMNOLOGIQUE



TOME PREMIER

LAUSANNE
F. ROUGE, ÉDITEUR
Librairie de l'Université
4, RUE HALDIMAND, 4

1892

LAUSANNE. — IMPRIMERIE CH. PACHE & Cie

PRÉFACE

Né et élevé à Morges, sur les bords du Léman, j'ai vécu cinquante ans dans l'intimité de ce beau lac que je viens décrire aujourd'hui. C'est par les leçons de mon vénéré père que j'ai été introduit dans l'étude scientifique ; je n'étais qu'un garçon de 13 ans quand, à l'occasion des fouilles archéologiques de nos cités lacustres de Morges, il a commencé à m'instruire dans l'art d'observer et d'interroger la nature ; j'ai continué, sous les yeux de ce maître chéri, à travailler les problèmes nombreux et divers que le lac, un véritable microcosme, pose à la curiosité humaine ; encouragé et guidé par ses conseils, j'ai voué à cette recherche le meilleur de mon activité de naturaliste.

A la mémoire de mon père, le *Président François Forel, de Morges,* je veux dédier ce livre. Il en avait approuvé le plan. Puisse l'exécution n'être pas trop indigne de son souvenir et des exemples qu'il m'a laissés.

Je vais donc entreprendre une description du lac Léman, considéré aux divers points de vue qui peuvent intéresser l'étude scientifique. Ce sera, pour répondre à la demande fréquemment exprimée par mes amis et collègues, un essai de généralisation

du Léman est déjà considérable. Pour nous, ses riverains, le Léman est le roi des lacs; nous l'aimons avec enthousiasme, avec passion; saurions-nous faire mieux que célébrer les beautés de l'objet de notre culte? — Mais ce n'est pas dans cet ordre d'idées que je chercherai l'explication de mon choix. Il résulte tout simplement de notre fidélité à cette règle générale qui veut que le naturaliste étudie la nature dans les faits et choses qui sont à sa porte. Pour celui qui n'est pas naturaliste voyageur, qui ne va pas chercher des découvertes nouvelles dans des terres inconnues, il doit s'attacher aux choses qu'il a journellement sous les yeux, qu'il peut voir et revoir assez souvent pour en démêler les lois et l'ordonnance, aux faits qui se reproduisent devant lui, tellement qu'il peut en trouver l'explication en y appliquant aussi souvent que nécessaire l'observation et l'expérimentation. Le naturaliste sédentaire a le droit et le devoir de décrire son pays, sa patrie; si sa patrie est belle, et bonne, et intéressante, c'est une heureuse fortune pour lui, et c'est le lot qui nous est échu en partage.

Ce n'est ni d'aujourd'hui ni d'hier que date l'idée de réunir, je ne dirai pas en un corps de doctrine, le mot serait trop ambitieux pour des études sans prétentions, mais en une généralisation, en un résumé d'ensemble, les travaux isolés exécutés dans le domaine du lac, de faire pour les lacs ce que la géographie et la géologie représentent pour la terre, l'océanographie pour la mer. Les anciennes descriptions du lac Léman, celle de Fatio de Duillier, celle de H.-B. de Saussure, celle du Doyen Bridel, celle d'Alph. Favre, sans parler des compilations modernes, [1] dues à des étrangers qui, ne connaissant pas le lac, n'ont pu travailler que sur des matériaux de seconde main, sont déjà de tels essais de généralisation.

[1] J'en citerai une seule, le *Léman* par Ch. Lenthéric, Avignon 1885; la science et l'art de l'écrivain, qui avait depuis longtemps fait sa chose de l'étude du Rhône, l'avaient bien préparé à s'occuper du Léman qui n'est à certains points de vue qu'un accident du fleuve méditerranéen.

Mais le plan bien déterminé d'appliquer à l'étude des choses du lac les méthodes de la géographie, de faire pour notre lac, dans un cadre bien ordonné, une étude générale et spéciale d'histoire physique et naturelle, a déjà été formulé. En 1871 M. l'ingénieur R. Guisan avait préparé un projet très complet d'étude du lac qui en est resté à l'état de manuscrit et n'a pas été suivi d'exécution. Je viens de retrouver ce projet dans mes notes, et mon parent et ami de Lausanne verra peut-être dans le livre que je publie aujourd'hui la réponse aux questions qu'il nous posait alors.

Une commission mixte, nommée en juin 1872 par la Société de physique et d'histoire naturelle de Genève et par la Société vaudoise des sciences naturelles, composée de MM. E. Plantamour, président, A. Favre, V. Fatio, L. Dufour, E. Guillemin et F.-A. Forel, avait été chargée de procéder à l'étude scientifique du lac. J'avais été invité à préparer un projet qui a été publié dans le Bulletin de la Soc. vaud. sc. nat., XI, 401. Lausanne, 1872. Malheureusement, la commission, qui pourtant semblait pleine d'ardeur et de bonne volonté, ne fut plus convoquée par son président, et le plan tomba dans l'eau.

Sous le titre de « Notice sur l'histoire naturelle du lac Léman » j'ai rédigé en 1877 un résumé de 27 pages des principaux faits de limnologie; il a été imprimé dans la description de Montreux, qu'avec un groupe d'amis nous avons publiée sous la direction d'Eugène Rambert; une seconde édition de ce travail a paru en 1886 à Genève, chez Georg, éditeur, sous le titre « Le lac Léman, précis scientifique » en 74 pages.

Nous avons eu, dans l'élaboration de ce livre, à lutter contre deux grosses difficultés.

La première est commune à tous les ouvrages généraux de géographie physique. La géographie est l'application et l'utilisation des lois et faits constatés par les diverses sciences physiques et naturelles. Pour écrire un traité de géographie, il faudrait donc être un encyclopédiste, possédant l'ensemble des

connaissances humaines actuelles. Or, il n'existe plus de ces philosophes des siècles passés qui dominaient toute la science de leur temps; ils ont disparu dans notre ère de spécialisation à outrance. Devons-nous pour cela renoncer à faire de la géographie, à résumer dans une généralisation les faits de détail collectés par l'observation, à chercher l'explication et la théorie des phénomènes? Evidemment non; mais l'œuvre nous est plus difficile que jamais. Dans le volume que je publie aujourd'hui, j'ai dû faire de la géographie, quoique n'étant pas géographe, de la géologie, quoique n'étant pas géologue, de la climatologie, quoique n'étant pas météorologiste, de l'hydrographie, de l'hydrologie, quoique n'étant ni ingénieur ni technicien. Dans les volumes qui suivront, je devrais, pour être à la hauteur de ma tâche, me transformer successivement en un physicien, en un chimiste, un zoologiste, un botaniste, un archéologue, un historien, un économiste. Je vais avoir à présenter des études traitant successivement de toutes ces sciences à la critique de spécialistes... Que cette critique soit indulgente à l'auteur qui reconnaît son insuffisance sur tous les points, mais qui plaide les circonstances atténuantes en invoquant le but qu'il a eu devant les yeux. Il a aspiré à faire œuvre utile. Les anciennes descriptions du Léman nous ont servi chaque jour dans notre carrière de naturaliste; peut-être la nôtre aura-t-elle aussi son intérêt. L'histoire naturelle n'est que la collection se renouvelant sans cesse des travaux des générations qui se succèdent; le tableau d'ensemble des faits que nous avons réunis, nos prédécesseurs, nos contemporains, nos collaborateurs et nous-même, devait être établi; il sera, nous osons l'espérer, commode pour ceux qui continueront après nous à étudier le même champ. Malgré la témérité de l'entreprise, nous avons tenté d'apporter notre pierre à la construction de cet édifice qui s'appelle l'histoire physique et naturelle du lac Léman.

La seconde difficulté dans la composition de notre monographie a été la diversité des lecteurs auxquels nous devons nous adresser. Les choses du lac intéressent le public scienti-

fique ; nombre de faits de physique générale, d'histoire naturelle, de géographie du Léman appartiennent à la science et doivent être résumés pour les physiciens et naturalistes de profession. — Les choses du lac intéressent l'homme instruit qui veut avoir l'explication des faits de la nature qui l'intriguent ou qu'il admire. — Les choses du lac intéressent les riverains, pour lesquels la vaste masse d'eau du Léman est un océan qui intervient dans tous les incidents de la vie individuelle ou sociale. — Les choses du lac intéressent le batelier ou le pêcheur qui vit sur le lac, qui vit du lac, et qui réclame des notions et instructions précises sur les éléments de son industrie. Or il n'eût pas été possible d'avoir quatre ou cinq éditions différentes d'une monographie du Léman, chacune d'elle traitant les mêmes faits au point de vue spécial d'un public restreint ; nous serons donc obligé de combiner dans nos descriptions tous les intérêts auxquels il nous faut satisfaire, et nous devrons donner en même temps aussi bien les faits et théories qui s'adressent à l'homme de science que les détails pratiques qui répondent aux questions d'un batelier du lac. Il en résultera une inégalité fâcheuse dans le degré des notions exposées successivement dans nos divers chapitres ; qu'elle nous soit pardonnée par ceux qu'elle choquera. Que nos collègues les naturalistes et les physiciens excusent les explications qui leur paraîtront trop triviales ou trop banales ; elles ne s'adressent pas à eux. Que nos collègues les riverains, les bateliers et les pêcheurs excusent les dissertations qui leur paraîtront trop scientifiques ou trop obscures ; elles ne s'adressent pas à eux. Que les uns et les autres les passent dans leur lecture et qu'ils les laissent à ceux que cela pourra intéresser. Nous ne pouvons avoir la prétention de satisfaire en même temps à des besoins si différents ; si chacun de ceux auxquels nous pensons arrive à trouver dans ce livre quelques faits, quelques explications qui répondent à ses questions personnelles, nous nous estimerons heureux d'avoir atteint notre but.

J'ai dit que dans mon entreprise j'avais été seul et sans appui. Je ne veux pas être ingrat. Depuis Fatio de Duillier, qui le premier a donné une description du Léman, depuis H.-B. de Saussure, qui le premier a appliqué sur les lacs, et avec quelle maîtrise! l'observation et l'expérimentation scientifiques, le Léman a eu de nombreux et fervents scrutateurs.

C'est par dizaines, par centaines peut-être, que je compterais les hommes dont les travaux m'ont servi pour l'élaboration de cette monographie. Vais-je essayer d'en donner la liste? je ne l'ose. Je craindrais d'être injuste ou incomplet en omettant à l'entrée de ce volume quelque nom qui apparaîtra dans la suite de mes descriptions. Mais surtout, je ne saurais, dans une simple énumération, mettre à leur place, mettre à leur plan, les divers hommes sur les recherches desquels je me suis appuyé. Les uns sont des théoriciens, les autres des praticiens quelques-uns ont établi les lois des phénomènes, d'autres ont observé quelques faits; les uns sont des hommes de science dont le nom est universellement connu, d'autres sont de modestes naturalistes, des observateurs d'occasion, des bateliers ou des pêcheurs dont les notes et remarques m'ont été précieuses. Tous ont été utiles; c'est leur travail collectif que je dois résumer. Je tâcherai, dans le cours de ces volumes, de rendre hommage à qui de droit de tout ce que je tiens d'autrui; l'on y verra combien importante a été cette collaboration d'hommes divers, de toutes classes et de toutes professions, anciens et modernes, collaboration à laquelle cet ouvrage devra surtout son intérêt. Pour nombre de chapitres, je ne serai que le rédacteur ou le traducteur des travaux de mes prédécesseurs et de mes collègues.

Je dois, en terminant ce premier volume, exprimer ma reconnaissance toute particulière à MM. R. Billwiller à Zurich, C. Butticaz à Genève, A. Delebecque à Thonon, Ch. Dufour à Morges, H. Dufour à Lausanne, L. Duparc à Genève, H. Golliez à Lausanne, L. Gonin à Lausanne, Ch. Guiguer de Pran-

gins à Lausanne, J. Hörnlimann à Berne, J.-J. Lochmann à Berne, E. Renevier à Lausanne, H. Schardt à Montreux, qui ont bien voulu réviser tout ou partie des épreuves de mon livre et en corriger les imperfections.

Dr F.-A. Forel,
professeur à l'Université de Lausanne.

Morges, Juillet 1892.

Bibliographie. Généralités sur le Léman.

J.-C. Fatio de Duillier. Remarques sur l'histoire naturelle des environs du lac de Genève. *in* Spon, Histoire de Genève, II, 449. Genève 1730.

H.-B. de Saussure. Le lac de Genève, 1er chapitre des Voyages dans les Alpes, I, 4. Neuchâtel. 1779.

Le doyen Bridel. Essai sur le lac Léman, *in* le « Conservateur suisse », V. 5. Lausanne 1814.

Martignier et *de Crousaz.* Article « Lac Léman » du Dictionnaire historique et géographique du canton de Vaud. Lausanne, 1867.

Alph. Favre. Le Lac de Genève. Appendice à la Description géologique du canton de Genève. II, 127. Genève, 1880.

Ch. Lenthéric. Le Léman. Avignon, 1885.

F.-A. Forel. Le lac Léman, précis scientifique. Genève 1886.

Noms et termes locaux, indigènes ou peu connus.

ABYSSAL, qui se rapporte aux abîmes d'un lac ou de la mer.

ARAN, cap sous-lacustre de la beine (v. p. 83).

BATHYMÉTRIQUE, qui se rapporte à la mesure de la profondeur : sondage bathymétrique.

BAYE, torrent du pays de Montreux.

BEINE, terrasse littorale immergée (v. p. 75).

BISE, vent du nord-est.

BORNAN, vent du sud, venant de la vallée de la Drance.

CLUSE, vallée transversale, perpendiculaire à la chaîne de la montagne.

FŒHN, vent du sud dans la Suisse allemande.

INLANDSIS, glacier en nappe, étendu sur le continent du Grönland.

ISOBATHE, de même profondeur au-dessous de la nappe du lac : courbe isobathe.

ISOHYPSE, de même altitude au-dessus du niveau de la mer : courbe isohypse

JORAN, vent du nord-ouest.

LIMICOLE, qui habite dans le limon.

MÔLAN, vent du sud-est à Genève, venant de la vallée de l'Arve.

MONT, talus de la beine.

MORAINE, dépôt de matériaux rocheux ou terreux, accumulés par le glacier : sur ses bords, moraines latérales, — devant son front, moraine frontale, — sur le plafond de son ravin, moraine profonde, — dans son épaisseur, moraine interne.

MORGET, brise de terre, brise nocturne.

NANT, ruisseau, petite rivière.

NUNATAK, îlot rocheux, émergeant de l'inlandsis.

OMBLIÈRE, lieu de fraie de l'omble-chevalier.

PLAFOND, fond plat d'un lac, d'une vallée.

REBAT, brise du lac, brise diurne.

SÉCHARD, synonyme de rebat.

SEICHE, vague de balancement de l'eau d'un lac (voir l'explication dans le 2e vol.).

SUDOIS, vent du sud-ouest.

TÉNEVIÈRE, haut-fond pierreux, submergé, au milieu de la beine.

THALWEG, plafond d'une vallée.

VAUDAIRE, vent du sud-est, föhn du Bas-Valais et du Haut-lac.

Signes et abréviations.

RPN.	Repère de la Pierre du Niton à Genève (v. p. 18).
ZL.	Zéro limnimétrique du Léman, étiage du lac (v. p. 454).
AA.	Altitude absolue au-dessus du niveau de la mer.
S. V. S. N.	Société vaudoise des sciences naturelles.
S. H. S. N.	Société helvétique des sciences naturelles.
S. A. C.	Club alpin suisse.
Archives, Genève.	Archives des sciences physiques et naturelles, publiées à Genève.
$8^{h\,m}$ =	8 heures du matin.
$11^{h\,s}$ =	11 heures du soir.
$10^{m\,sec}$ =	10 mètres à la seconde (vitesse du vent).
$150^{m3\,sec}$ =	150 mètres cubes à la seconde (débit d'un fleuve).

(Pour les autres signes, j'ai suivi la notation du Bureau international des poids et mesures.)

AVANT-PROPOS

L'outillage du naturaliste pour l'étude des lacs.

Les recherches diverses qui peuvent se faire dans un lac nécessitent quelques appareils et instruments, en général peu compliqués. Dans les chapitres ultérieurs de ce livre j'aurai à décrire les instruments spéciaux que nous avons utilisés; ici je veux donner seulement quelques indications sur ceux des appareils qui forment la base de l'outillage du naturaliste.

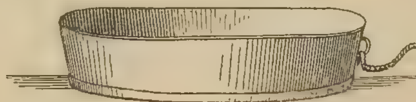
Les conditions d'étude, dans un lac de petites dimensions comme nos lacs de l'Europe centrale, sont fort différentes de celles de la mer. Les vagues et les courants y sont moins puissants; les distances à parcourir étant moins considérables, l'on peut faire abstraction du mauvais temps, et organiser les recherches pour le calme absolu ou relatif de l'air et des eaux. Les barques y sont aussi plus légères; ce sont de simples nacelles sur lesquelles on ne peut établir qu'un appareil peu encombrant. Les grandes sondes, les grandes dragues utilisées dans l'Océan ne seraient pas en place dans nos petites péniches, et j'ai dû m'appliquer à simplifier et à réduire autant que possible le matériel et le manuel opératoire.

Je décrirai ici, dans ce paragraphe d'introduction, trois appareils d'un usage fréquent, qui sont utilisables dans toutes les recherches.

1° *La lunette à eau.* Même par un lac calme la vision des objets immergés est très fatigante et très peu nette pour un observateur logé dans une barque ; le moindre mouvement de la nacelle développe des ondes qui altèrent l'horizontalité de la nappe d'eau en réfractant les rayons visuels ; les objets submergés subissent des déformations et des déplacements apparents à l'œil, et leur vacillement dérange grandement l'observateur. Bien plus encore, si l'eau est ridée par les vaguelettes d'une brise, ou agitée par les vagues mortes ou vives d'un grand vent, l'étude des faits sous-lacustres est gênée ou même rendue impossible.

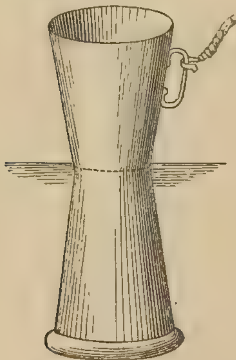
Nous y obvions par l'emploi de la lunette à eau, baquet à fond de verre plat, qui flottant sur l'eau, permet, au travers de sa lame horizontale, une vision parfaitement nette. Nous donnons à cet appareil deux formes qui, suivant les circonstances, peuvent présenter quelques avantages.

Celle dont je me sers est un bassin (fig. 1) de 50^{cm} de diamètre, à



(Fig. 1.) Lunette à eau, modèle F.-A. Forel.

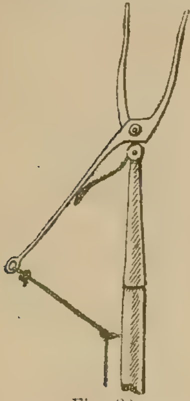
bords faiblement évasés, en feuille de zinc, de 10^{cm} de hauteur. Le fond est une lame de verre transparent. Je pose le baquet sur l'eau en l'attachant au bateau par une ficelle lâche, et ma lunette me suit dans tous les déplacements de la barque.



(Fig. 2.) Lunette à eau, modèle des Genevois.

La lunette des Genevois (fig. 2) est un peu plus volumineuse. C'est un double cône de 80^{cm} de hauteur, de 30^{cm} de diamètre à ses extrémités, un peu rétréci dans son milieu ; un cercle de plomb l'alourdit par le bas et le redresse, de telle sorte que le plan de flottaison est à peu près au milieu de la longueur. Avec la plus grande hauteur de ses bords, ce modèle a l'avantage de laisser moins souvent entrer quelques gouttes d'eau qui terniraient la face supérieure de la glace ; il est en revanche un peu plus encombrant que ma lunette, et a un champ visuel moins étendu.

2° La *pince*. Pour ramasser au fond de l'eau les pierres, bois ou pièces antiques, nous employons la *pince de l'archéologue* (fig. 3); c'est un instrument en fer, bâti sur le type de l'échenilloir du jardinier, mais dont les mors, au lieu d'être tranchants, sont aplatis. Un ressort les tient ouverts à l'état de repos; une cordelette, passée dans un anneau vissé au manche, permet de serrer les mors de la pince et de saisir l'objet désiré. Un manche de bois de 3 à 5m de longueur suffit à porter la pince dans les plus grands fonds où nous ayons à pratiquer des pêches lacustres.


(Fig. 3.)
Pince de l'archéologue.

3° La *ligne de sonde* est l'instrument indispensable au naturaliste; elle lui sert à mesurer la profondeur de l'eau, à apprécier la nature du sol, à descendre dans les lacs le thermomètre ou les appareils photométriques, à manœuvrer les dragues et filets qui recueillent les échantillons d'eau ou de vase, qui capturent sur le sol les animaux ou les plantes, qui pêchent les organismes à la surface ou entre deux eaux. Son usage est journalier pour qui veut scruter les mystères des régions profondes du lac.

Pour quelques études spéciales la ligne de sonde doit être faite en fil d'acier (voir plus loin les sondages bathymétriques); mais une telle ligne a bien des inconvénients; elle doit être toujours tendue, à peine de voir se former des boucles qui, à la première traction, amèneront la rupture du fil; elle demande une attention toute particulière et de grandes précautions dans son maniement et dans son entretien; elle doit toujours être graissée pour éviter la rouille. Pendant quelques années, j'ai employé, concurremment à des lignes en corde de chanvre, un fil de laiton d'un millimètre de diamètre, qui a l'avantage sur le fil d'acier de ne pas s'oxyder, mais qui est un peu moins tenace. J'ai reconnu que le fil métallique n'ayant que des frottements très faibles dans l'eau permet une plus grande délicatesse dans l'appréciation de la nature du sol, et a de grands avantages pour certaines opérations de dragage. Mais sa plus grande fragilité, et les précautions minutieuses qu'il nécessite pour éviter la formation des boucles, m'ont décidé à y renoncer pour l'usage habituel des pêches, dragages, etc., et je me

tiens aujourd'hui à la ligne de chanvre, beaucoup plus sûre et plus commode à manier.

J'ai employé pendant plusieurs années une corde de fil d'aloès; elle est plus légère et plus économique que la sonde de chanvre. Mais elle est moins bien tordue, et celles que le commerce nous livre doivent être, à force égale, de plus gros diamètre, ce qui est un grave inconvénient. J'y ai renoncé.

Je recommande pour l'étude des lacs dont la profondeur ne dépasse pas 3 à 400 mètres une ligne de chanvre ou de lin de 3, 4 ou 5^{mm} de diamètre, bien tordue, à 3 ou 4 torons de 2 à 3 fils chacun. Celle que je possède, formée de 4 torons de 3 fils chacun, a une épaisseur de 5^{mm}; elle peut supporter sans se rompre 150^{kg}; elle est fournie dans le commerce au prix de 5 à 6 francs par 100^{m} de longueur.

Pour l'usage d'une telle ligne de sonde je donnerai quelques recommandations utiles.

a Avant tout la corde, qui est sur-tordue au sortir des mains du cordier, doit être détordue si l'on veut éviter la formation de boucles. Pour cela déroulez-la derrière le bateau en marche et laissez-la traîner dans le lac pendant une demi-heure au moins, en l'enroulant à diverses reprises sur le treuil. Poursuivez l'opération jusqu'à ce que la ligne, devenue parfaitement souple, ne forme plus de boucles lorsqu'elle n'est plus tendue.

b Il est bon de vitrioler la corde pour éviter une trop prompte détérioration. Pour cela plongez-la pendant 24 heures dans un baquet contenant une solution de sulfate de cuivre au 1 : 15e, puis laissez-la sécher. — Une corde faiblement goudronnée, quoique un peu moins souple, est aussi très recommandable.

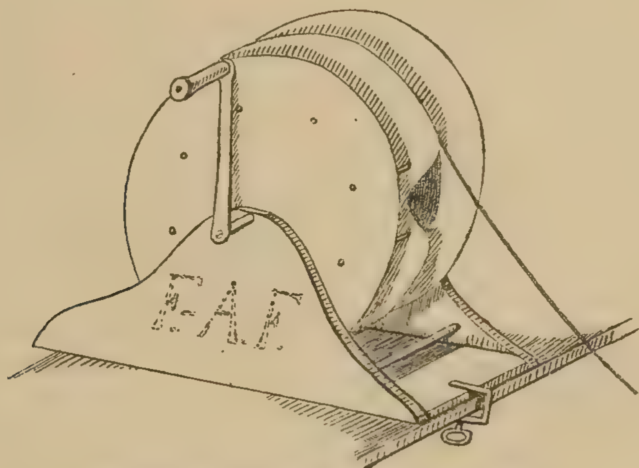
c Il est indispensable de faire sécher la sonde après chaque journée de travail avant de la rentrer en magasin; si on la laissait enroulée sur le treuil elle se moisirait et ne tarderait pas à se pourrir. Pour cela déroulez-la en boucles lâches sur un bâton, à la mode des pêcheurs, et suspendez-la dans un hangar où l'air circule librement. Une corde ainsi ménagée durera des années, en gardant son intégrité des premiers jours.

d Pour graduer la ligne de sonde je m'y prends comme suit. Je plante solidement dans le sol deux piquets verticaux, à 5 mètres de distance; j'enroule la corde mouillée autour de cette bobine en la tendant convenablement; je laisse sécher. Avec un pinceau je fais des

marques de couleur à l'huile qui atteignent tous les tours de la corde, en rouge par exemple sur l'un des piquets désignant les dizaines de mètres, en noir sur l'autre piquet signalant les demi-dizaines intermédiaires. Pour distinguer les différentes dizaines, j'y ajoute des nœuds de laine colorée ; la première dizaine à partir de 0, de 50, de 100, de 150 mètres, etc., est marquée par un nœud à côté de la tache rouge, la seconde dizaine par 2 nœuds, la troisième par 3 et ainsi de suite. Je distingue les séries de dizaines par la couleur différente des nœuds de laine, le noir étant réservé à la première moitié de la centaine, de 0 à 40, de 100 à 140, et le bleu à la seconde moitié, de 50 à 90, de 150 à 190, etc. Je n'ai pas à craindre de confusion d'une centaine à l'autre. Mon tableau de numérotation est donc :

	Laine noire.	Laine bleue.	Laine noire.	Laine bleue.
Tache rouge sans nœud,	0	50	100	150
» » un nœud,	10	60	110	160
» » deux nœuds,	20	70	120	170
» » trois nœuds,	30	80	130	180
» » quatre nœuds,	40	90	140	190

et ainsi de suite.



(Fig. 4.) Treuil de sonde portative, modèle Forel.

Quant au bout terminal de la sonde, de 0 à 20^{m}, j'y fais des marques de mètre en mètre avec des taches de couleur à l'huile ou des nœuds de laine. Cela a l'avantage de m'avertir, lorsque je relève la sonde, du

moment où j'approche de l'extrémité de la ligne et où je dois enrouler la corde avec précaution.

Pour le treuil, chacun peut le construire à sa fantaisie. Celui que j'ai adopté comme étant le plus léger, le plus mobile, le plus portatif, consiste en un cadre de bois et une bobine de fer (fig. 4). Le cadre est composé de deux planches verticales réunies par des barres horizontales qui en assurent la solidité.

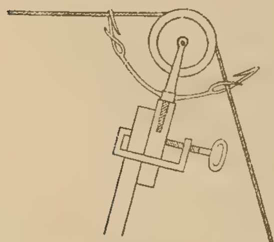
Au sommet mousse du triangle formé par ces planches verticales sont des tourillons, fermés par des clavettes, qui portent l'axe horizontal de la bobine. Celle-ci a pour supports latéraux des feuilles de tôle verticales réunies par des barres horizontales formant un cylindre à claire-voie. Une cloison médiane de la bobine, en feuille de tôle également, soutient par le milieu les barres du cylindre ; une encoche profonde permet de faire passer à volonté la corde d'un côté à l'autre de cette cloison, de manière à ne pas mouiller inutilement la partie de la sonde qui n'est pas descendue dans l'eau, lors d'une opération à petite profondeur.

Une manivelle extérieure met la bobine en mouvement.

Je fixe le cadre du treuil sur un des bancs du bateau au moyen de deux petites presses à vis, en fer (fig. 5).


(Fig. 5.)
Presse à vis.

Si la barque porte un mât convenable, j'y suspends une poulie encochée, sur laquelle je fais rouler la ligne en l'écartant ainsi des bords du bateau. Si, comme c'est le cas le plus fréquent sur nos nacelles des petits lacs, ce mât fait défaut, je fixe une poulie sur le bordage de la barque, à l'aide d'une presse à vis. C'est une poulie de métal munie de deux boucles ovales offrant chacune une fente en biseau par laquelle on fait entrer ou sortir la corde (fig. 6).

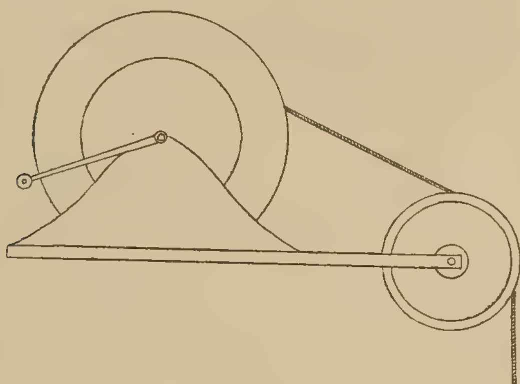

(Fig. 6.)
Poulies à boucles encochées.

Pour guider la corde sur la bobine et obtenir un enroulement régulier, sur l'une ou l'autre des moitiés de la roue, je me sers d'une boucle de métal ouverte, ou du porte-mousqueton du commerce.

Il est un autre type de treuil, plus simple et plus pratique à certains égards, que j'ai vu employer sur le lac de Constance (fig. 7).

C'est un cadre en bois portant outre la bobine, comme dans le

modèle que je viens de décrire, une poulie mobile sur une tringle de fer. Cette poulie de bois avec une gorge profonde glisse latéralement sur la tringle et la déplace automatiquement à mesure que, dans l'enroulement sur la bobine, la corde s'avance d'une extrémité à l'autre du tour. On fixe le cadre à l'aide de deux presses à vis (fig. 5) de telle manière que la poulie surplombe au dessus de l'eau. Cet appareil fonctionne à souhait tant que l'on ne pratique que des sondages verticaux, mais sitôt que dans une opération de dragage la corde oblique sur le plan de la poulie, elle peut s'échapper de la gorge et le travail est fort entravé.



(Fig. 7.) Treuil de sonde portative. Modèle allemand.

Pour le naturaliste qui veut multiplier les opérations, et faire divers ordres de recherches, qui veut ne pas être à la merci d'un lac agité par des vagues, ou de l'imperfection d'une nacelle trop primitive, je recommanderai plutôt le premier type de treuil que je viens de décrire ; il est plus rustique et se prête mieux à toutes les circonstances.

Je n'ai pas à donner ici la description et l'énumération des divers appareils, outils, instruments et engins accessoires qui peuvent être utiles ou nécessaires au naturaliste ; ils font partie de l'outillage normal d'un bateau ou d'un laboratoire. Suivant les conditions spéciales où se trouvera placé l'investigateur des choses du lac, suivant qu'il se trouvera logé près ou loin de la rive, qu'il sera stationnaire ou ambulant, qu'il étudiera son propre lac ou qu'il sera un explorateur voya-

geur, suivant aussi ses goûts, ses besoins ou son génie personnel, son arsenal sera plus ou moins riche. Je me bornerai à formuler la recommandation suivante : Cherchez à simplifier, à réduire vos appareils; toute complication peut devenir encombrante.

Un dernier conseil pratique : Employez toujours le zinc, qui ne s'oxyde pas dans l'eau douce, de préférence au ferblanc.

Quant à la manœuvre de ces instruments, tout batelier saura la pratiquer dès le premier essai. Le naturaliste en apprendra bien vite le maniement ; un court apprentissage le mettra au courant des procédés et du manuel opératoire. J'aurai encore l'occasion de donner quelques conseils lorsque nous arriverons à la description des opérations spéciales à certaines recherches.

LE LÉMAN

LE LÉMAN

Définitions. Plan de l'ouvrage. Cartes de géographie.

Définition. Un lac est une masse d'eau stagnante, réunie dans une dépression du sol, sans continuité avec la mer.

Par les mots absence de continuité avec la mer, cette définition fait la distinction entre les lacs d'une part et les estuaires et lagunes d'autre part; dans ces derniers l'eau de la mer peut refluer, le liquide est plus ou moins saumâtre, et les sociétés biologiques qui les habitent se rapprochent des types marins. Dans un lac la possibilité de tout mélange avec l'eau de mer est exclue.

Le niveau de l'eau d'un lac est réglé par les rapports entre le débit des affluents (précipitations aqueuses de l'atmosphère et rivières) et celui des effluents (évaporation et fleuve émissaire). Ces rapports peuvent être différents et servir de base à une classification systématique des lacs, fondée sur l'existence ou non d'un émissaire.

Si le débit des affluents est constamment supérieur à la valeur de l'évaporation, le niveau de l'eau dépasse la digue de support du lac et le trop plein s'écoule vers la mer. Le lac a un émissaire permanent.

Si le débit des affluents en saison humide est suffisant pour rem-

plir le lac à pleins bords, et si en saison sèche il est inférieur en puissance à l'évaporation, le lac a un émissaire temporaire.

Si le débit des affluents n'arrive pas, même en saison humide, à faire déborder le lac, celui-ci est un lac sans émissaire.

Dans les lacs à émissaire permanent l'eau se renouvelle sans cesse; elle est peu chargée de sels. Ce sont des lacs d'eau douce.

Dans les lacs sans émissaire l'eau se concentre par évaporation; elle se surcharge de sels. Tout lac sans émissaire est un lac d'eau salée.

Quant aux lacs à émissaire temporaire, suivant la durée relative de l'écoulement de l'eau par l'affluent, l'eau est douce, saumâtre ou salée.

Cette distinction est donc fondamentale, et elle doit servir de base à la classification des lacs.

Les lacs à émissaire permanent sont par nature toujours remplis d'eau. Ils sont eux-mêmes permanents.

Quant aux lacs à émissaire temporaire et aux lacs sans émissaire, essentiellement suivant leur profondeur, et aussi suivant le climat de la région, ils seront ou permanents ou temporaires. Ils seront permanents quand dans la saison sèche l'évaporation n'arrivera pas à mettre à nu leur plafond; ils seront temporaires quand toute la masse de l'eau pourra être enlevée par évaporation.

Au point de vue de leur profondeur relative on peut séparer les lacs en trois types généraux que je définis comme suit :

Un lac, proprement dit, est un lac profond ou de grande profondeur.

Un étang est un lac de faible profondeur. Ex.: lac Trasimène.

Un marais est un étang assez peu profond pour qu'il soit envahi par la végétation des plantes enracinées, dont les tiges s'élèvent dans l'air : roseaux, typhas, etc.

Cette division n'est pas essentielle; entre ces trois types il y a toutes les transitions possibles.

Plan de l'ouvrage. La monographie que je commence ici est consacrée à la description et l'étude du Lac Léman, considéré aux divers points de vue qui peuvent intéresser l'homme de science, le naturaliste, le physicien, le technicien ou le simple curieux des choses de la nature; je chercherai à en enchaîner les différentes parties de manière à former, si possible, un tout. C'est un essai de synthèse des études isolées qui, depuis des siècles déjà, ont été concentrées sur

notre beau lac par les efforts successifs des naturalistes riverains des quatre cantons du Léman.

Je diviserai l'ouvrage en parties qui traiteront successivement :

1° La géographie ;
2° L'hydrographie ;
3° La géologie ;
4° La climatologie ;
5° L'hydrologie ;
6° La mécanique ;
7° La chimie ;
8° La thermique ;
9° L'optique ;
10° L'acoustique ;
11° La biologie ;
12° L'histoire ;
13° L'économie publique.

L'appellation que je donne à quelques-unes de ces parties demandera à être précisée quand nous y arriverons.

Cartes géographiques. Le lecteur pourra s'orienter sur la géographie de la région du Léman et retrouver la plupart des localités que nous aurons à citer en consultant les deux cartes générales que nous donnons dans le présent volume, à savoir :

a) La petite carte au 1 : 350 000e. Cette feuille de titre est un report de la carte suisse au 1 : 250 000e. (1)

b) La carte hydrographique du lac au 1 : 100 000e, dont le terrain est un report de la carte d'état-major connue sous le nom d'atlas Dufour.

Je suis heureux de saisir cette occasion pour témoigner au bureau topographique fédéral, et tout spécialement à son chef, M. le colonel J.-J. Lochmann, ma reconnaissance pour l'autorisation qui m'a été accordée de faire faire ces reports d'après les cartes fédérales, et plus généralement pour l'appui effectif et bienveillant que j'ai reçu pendant tout le cours de mes études. Les naturalistes suisses savent tous avec quel dévouement et quel désintéressement le corps du génie fédéral vient à leur aide pour toutes les études qui touchent à la géographie

(1) Le procédé de report, en cliché de zinco-gravure, n'a pas permis de faire des corrections : la profondeur maximale du lac, indiquée dans cette carte par 334m, doit être corrigée en 309m, comme nous le verrons plus loin.

de la patrie. Le domaine où cette intervention a été la plus féconde, la plus riche en résultats nouveaux, est certainement celui de l'hydrographie des lacs. Par l'établissement des cartes hydrographiques, les ingénieurs suisses ont donné à l'étude scientifique une base assurée, sur laquelle nous pouvons fonder nos descriptions, nos déductions, nos hypothèses et nos théories. La monographie que je commence ici est un premier essai d'utilisation de l'une de ces cartes. Dès la première page, je tiens à exprimer ma gratitude à ceux auxquels je dois les plus importants matériaux de mon travail.

Outre ces cartes, qui ne figurent que la région du lac lui-même, le lecteur pourra consulter les cartes générales suivantes.

1° Carte suisse au 1 : 250 000e, feuille III, qui donne toute la région, avec le bassin d'alimentation du lac.

2° Carte suisse, atlas Dufour, au 1 : 100 000e, feuilles XVI et XVII.

3° Carte vaudoise au 1 : 50 000e, feuilles VII, VIII, IX et X, en deux éditions, l'une avec le figuré du sol en hachures, l'autre avec courbes isohypses de 16m d'équidistance : la partie française n'est pas dessinée sur cette carte.

4° Atlas Siegfried, atlas des minutes de la carte suisse, au 1 : 25 000e, avec courbes isohypses de 10m. Des 23 feuilles qui comprendront le lac Léman, les feuilles suivantes sont publiées en 1891 : 438 *bis*, 440, 464, 465, 466 ; les autres paraîtront successivement, très prochainement.

5° Carte sarde au 1 : 50 000e, feuilles St-Gingolph, Thonon et Genève.

6° Carte du Dépôt des fortifications de France au 1 : 500 000e, feuille IX.

7° Carte du ministère de l'Intérieur de France au 1 : 100 000e, feuilles Thonon, St-Julien, St-Claude, les Echampés ; la rive suisse y est aussi dessinée.

8° Carte de l'état-major français au 1 : 80 000e, feuille Thonon.

9° Minutes de la carte d'état-major au 1 : 40 000e; ces minutes n'existent pas dans le commerce.

PREMIÈRE PARTIE

GÉOGRAPHIE

I. **Définition.**

Le Léman est un lac d'eau douce situé au pied du versant nord de la grande chaîne des Alpes centrales, dans la partie sud-occidentale de la plaine suisse, qui s'étend entre les Alpes et le Jura. Il a pour principal affluent le Rhône du Valais, et pour émissaire le Rhône de Genève.

Suivant les intérêts en jeu, il peut être considéré comme étant :

ou bien le bassin de réception des eaux du Valais, des Alpes vaudoises, du Chablais, et du sud du pays de Vaud;

ou bien la source du Rhône français;

ou bien une partie stagnante du cours du Rhône.

II. **Situation géographique.**

La position du centre de figure du Léman est par 46° 27′ lat. N. et 6° 32′ long. E. de Greenwich.

Ses bords extrêmes sont :
au nord, fond du golfe de Morges . . . . par 46° 31′ 3″ lat. N.
au sud, port de Genève. . . . . par 46° 12′ 27″ »
Son étendue en latitude est donc de 18′ 36″
à l'ouest, près de Pregny . . . . » 6° 9′ 6″ long. E.
à l'est, près de Chillon . . . . » 6° 55′ 56″ »
Son étendue en longitude est donc de 46′ 50″.

Le cercle parallèle à l'équateur qui passe par le Léman traverse la France, aborde l'Atlantique à quelques kilomètres au nord des Sables-d'Olonne en Vendée, traverse l'Atlantique, passe un peu au sud du cap Race (Terre-Neuve), aborde l'Amérique au nord de la Nouvelle-Ecosse (Canada), traverse le canal Ste-Marie entre le lac Supérieur et le lac Huron, longe la rive sud du lac Supérieur, laissant au nord le lac Supérieur, au sud les autres grands lacs, quitte la côté occidentale des Etats-Unis à l'embouchure de la rivière de Colombie, au sud du territoire de Washington, traverse le Pacifique du nord, passe dans l'Archipel des Kouriles, et le sud de Sackalin, aborde l'Asie dans la province du Littoral de la Sibérie, traverse la Mandchourie, la Mongolie, le lac Balkasch, le lac Aral, le nord du lac Caspien, la mer d'Azof, laisse au sud la Crimée et Odessa, traverse la Bessarabie, la Moldavie, la Transylvanie, la Hongrie, etc.

Le cercle méridien du Léman passe à l'ouest du Spitzberg, traverse l'extrémité occidentale de la Norwège, laisse le Danemark à l'est, et aborde le continent européen près de Groningen au nord de la Hollande. Dans la direction du sud il quitte l'Europe près de Fréjus, traverse la Méditerranée, aborde en Afrique près de Philippeville, traverse le Sahara, le pays du Niger, arrive à la mer près des bouches de ce fleuve, et continue sur l'Atlantique du sud en laissant à l'est toute l'Afrique méridionale.

L'antipode du lac Léman est situé dans le Grand-Océan à 320^{km} au sud-est de l'îlot de Warekauri (île Chatham) à l'est de la Nouvelle-Zélande.

III. **Altitude.**

Les premières déterminations de l'altitude du lac Léman ont été faites, dès le milieu du XVIIIe siècle, par le moyen du baromètre. J'en citerai quelques-unes d'après Delcross (1) et G. H. Dufour. (2)

Deluc	1757.	Genève, Turin, Méditerranée.	371.55^m
Deluc	»	» » »	365.77
Deluc	1770.	Genève, Beaucaire, Méditerranée.	388.18
Pictet			366.41
Schuckburgh			374.22
Delcross	1813.	Genève, Paris, Océan.	375.62
Delcross, moyennes de Deluc revisées			374.69

Delcross, prenant la moyenne entre ses propres calculs et ceux de Deluc qu'il avait soumis à une revision méthodique, arrivait à la cote 375.15^m, bien peu éloignée de la vérité.

M. Alph. de Candolle (3) donne pour l'altitude du lac, d'après la moyenne des meilleures observations barométriques, 374.23^m.

Plus tard sont venues les déterminations géodésiques et les nivellements des ingénieurs.

La base de toute l'hypsométrie suisse est le repère de la Pierre du Niton à Genève. C'est une plaque de bronze scellée en 1820 par le général Dufour (4) au sommet de la plus basse des deux pierres de

(1) *Delcross.* Détermination de la hauteur du lac de Genève au-dessus de la mer moyenne. Bibl. univ. Sc. et Arts V, 184. Genève, 1817. — J'aurai fréquemment à citer des mémoires tirés de l'importante collection de la Bibliothèque universelle et des Archives des sciences physiques et naturelles de Genève. J'abrégerai la citation en écrivant Bibl. univ. et Arch. de Genève. Cette collection est divisée en plusieurs séries ou périodes dont l'appellation est un peu compliquée et peut prêter à confusion ; je me bornerai à indiquer le numéro du volume et l'année de la publication.

(2) Extrait d'un mém. de *M. Filhon* sur les différences de niveau de quelques points de la chaîne du Jura et du bassin du Léman. Bibl. univ. LI, 217. Genève 1832.

(3) *A. de Candolle.* Hypsométrie des environs de Genève. Mém. de la Soc. de Phys. de Genève, VII, 390, 1839. — On trouvera dans cet important mémoire toutes les indications bibliographiques et numériques sur les anciennes déterminations de l'altitude du lac.

(4) *G. H. Dufour.* Note sur les limnimètres établis à Genève. Bibl. univ. XIII, 152. Genève 1838.

granit, blocs erratiques qui sortent de l'eau dans la partie orientale du port de Genève, devant le quai des Eaux-Vives. C'est, des deux pierres connues sous le nom de Pierres du Niton, celle qui est la plus éloignée du rivage.

Le repère de la Pierre du Niton est désigné dans l'hypsométrie suisse par les lettres RPN, quelquefois PN. Exemple : Le seuil du grand portail de la cathédrale de Lausanne est à l'altitude RPN + 152.25m.

La plaque de bronze est, d'après les notes de Dufour, à un pouce au-dessous du sommet de la pierre. Cette donnée a été confirmée par une étude du repère faite en 1882 par M. l'ingénieur Guiguer de Prangins, sous les ordres de M. L. Gonin, ingénieur des ponts et chaussées du canton de Vaud. La plaque de bronze soit le repère de la pierre du Niton est exactement à 27mm en contrebas du sommet du bloc. Une cavité carrée située au sud de la plaque a son fond à 477mm en contrebas du repère.

La grande pierre du Niton a son sommet, d'après M. Guiguer, à RPN + 0.619m

D'après le général Dufour, à RPN + 0.637

Les premières déterminations géodésiques ont été faites par des mesures d'angles zénithaux.

En 1829 le colonel Filhon [1] du corps royal d'état-major de France rattachait la Pierre du Niton à la hauteur de la Dôle déterminée par le colonel Coraboeuf. Il en tirait RPN = AA 378.669m. [2]

En 1833 le colonel Filhon [3] donna une correction à ses calculs primitifs et arriva pour le sommet de la petite pierre du Niton à AA 376.668m

ce qui donne pour RPN AA 376.641

Ce chiffre transformé en 376.64m a été admis par le général Dufour pour la base de l'hypsométrie des cartes fédérales suisses. Toutes les

(1) *G. H. Dufour.* Extrait d'un mém. de M. Filhon, etc. Bibl. univ. Sc. et Arts LI, 217. Genève 1832.

(2) Je désigne par ces deux lettres AA l'altitude absolue au-dessus du niveau de la mer.

(3) Lettres du colonel *Filhon* sur quelques corrections à apporter à l'extrait d'un mém., etc. Bibl. univ. LII, 212. Genève 1833.

cotes d'altitude de l'atlas Dufour au 1 : 100 000e sont rapportées à cette valeur.

D'après le général Dufour la nappe du Léman, dans les eaux moyennes, serait à 1.61m au-dessous de RPN, soit à l'altitude absolue de 375.03m. Ce chiffre a été arrondi à 375m dans la carte suisse au 1 : 100 000e (feuilles XVI et XVII).

Une mesure de la hauteur des lacs suisses et en particulier du Léman a été faite, de même par des mesures d'angles zénithaux, à l'occasion de l'établissement du réseau trigonométrique de la Suisse. (1) L'on est parti du sommet du Chasseral dont l'altitude absolue était connue par les mensurations françaises. Celles-ci l'évaluaient à 1610.54 et à 1608.60m. Le chiffre moyen 1609.57m a été admis par les ingénieurs suisses. Par des mesures d'angles, et en passant par les points intermédiaires du Chasseron, du Suchet, de la Dôle, de Bougy et de la tour de Nyon, l'on a trouvé pour la hauteur moyenne du lac Léman (2) 374.6m. (3) Il n'est malheureusement pas dit comment cette hauteur moyenne a été déterminée.

Puis sont venus les nivellements avec le niveau du géodésien, qui perfectionnant de plus en plus leur précision nous ont amenés enfin à des résultats satisfaisants.

En 1855 M. Schlemmer, ingénieur du chemin de fer de Lyon à Genève, (4) fit un nivellement partant du repère du pont de Tilsitt à Lyon, dont l'altitude au-dessus de l'Océan était évaluée à 163.0m. Il trouva pour RPN la cote 376.99m.

En 1858 (5) M. Bourdaloue, ingénieur du service spécial de la navigation du Rhône, partant du même repère du pont de Tilsitt, arriva par un nouveau nivellement à la cote de RPN = AA 376.733m.

En 1858 aussi, Bourdaloue relia le repère du pont de Tilsitt avec le

(1) Ergebnisse der Trigonom. Vermessungen in der Schweiz. Zurich 1840.

(2) Ergebn., p. 230.

(3) En note à la même page nous lisons que des observations de Henry et Corabœuf on est arrivé à 374.95m. Je n'ai pas pu retrouver les éléments de ce calcul.

(4) *J. Michel.* Mémoire pour servir à l'hypsométrie du bassin du Léman. Bull. S. V. S. N. VI, 372. — Je désigne par ces lettres le Bulletin de la Société vaudoise des Sciences naturelles que j'aurai fréquemment l'occasion de citer. Il se publie à Lausanne.

(5) *J. Michel.* Mémoire, etc., loc. cit.

zéro du port de Marseille, ainsi défini : Niveau des basses mers ordinaires, à 0.10^{m} au-dessus des plus basses eaux connues, à 0.40^{m} au-dessous du niveau moyen, à 1.0^{m} au-dessous des hautes mers. Il a trouvé pour le repère du pont de Tilsitt la cote 160.783^{m}, soit 2.217^{m} de moins que l'altitude jusqu'alors admise au-dessus de l'Océan.

Cela ramène la cote de RPN apportée au niveau de Marseille à l'altitude 374.516^{m}.

Une revision ultérieure (1) des calculs de Bourdaloue (1862) a corrigé ce chiffre et donne pour RPN :

374.052^{m} rapporté au niveau de Marseille.
373.252^{m} » au niveau de l'Océan.

Ce dernier était donc, pour les ingénieurs français, à 0.80^{m} au-dessus du zéro de Marseille. Les derniers travaux de M. Lallemand ont réduit cette différence à zéro. (2)

Le colonel Siegfried, chef du bureau topographique fédéral, a adopté pour l'atlas des Minutes de la carte fédérale une nouvelle cote obtenue par la jonction du nivellement de précision suisse avec le repère français du sommet du Chasseral. Elle donne pour RPN 376.860^{m}.

Cette cote de l'atlas Siegfried (3) est de 22^{cm} plus élevée que celle de l'atlas Dufour. De là la cote 375.3^{m} inscrite pour l'altitude de la nappe du Léman sur la feuille 438 *ter* de l'atlas des Minutes fédérales.

En faisant la jonction du nivellement de précision suisse avec le nivellement badois, en prenant la moyenne des chiffres des gares de Säckingen, d'Albbruch et de Constance, on trouve l'altitude de RPN à 373.40^{m} au-dessus du niveau de Berlin (Normal Null). (4) Mais il y a entre ces deux nivellements des discordances trop fortes ; il est bien préférable d'utiliser la jonction du nivellement suisse avec le nivellement alsacien aux gares de St-Louis, Laufen et Bâle qui diffèrent seu-

(1) *J. Michel.* Lettre au col. F. Burnier. Montpellier, 12 oct. 1863. Bull. S. V. S. N. VIII, 148. Lausanne 1864.

(2) *Ch. Lallemand.* Le niveau des mers en Europe et l'unification des altitudes. Revue scientifique, 1890.

(3) Cette correction du col. Siegfried en apportant une nouvelle cote pour la base fondamentale de l'hypsométrie suisse a été une innovation malheureuse. Elle a introduit une incertitude déplorable dans les altitudes absolues indiquées par les cartes suisses, qui sont, les unes rapportées à l'altitude de RPN 376.64^{m}, les autres à RPN 376.86, sans que cela soit formellement indiqué dans la plupart des cas.

(4) Le Normal Null de Berlin est de $5\,{}^{1}/_{2}{}^{cm}$ au-dessus du niveau moyen de la

lement de 13^{mm} entre les extrêmes [1] et donnent en moyenne pour l'altitude de RPN au-dessus du niveau de Berlin :

$$RPN = NN + 373.220 \pm 0.004^{m}.$$

Si nous ajoutons à ce chiffre la valeur de 56^{mm} qui exprime l'élévation du Normal Null de Berlin au-dessus du niveau moyen de la mer à Swinemünde nous obtenons

$$RPN = AA\ 373.276^{m}.$$

Le comité du nivellement général de France a procédé en 1889 à une révision du nivellement Bourdaloue et en a corrigé les erreurs. Le nouveau zéro adopté dans le port de Marseille (hauteur moyenne de la mer d'après les indications du marégraphe totaliseur et du médimarimètre) est à 7^{cm} au-dessous de l'ancien zéro de Bourdaloue. Par la clôture du polygone Moillesullaz, la Cluse, la Cure, Genève, Moillesullaz, M. Lallemand [2] a déterminé l'altitude absolue du repère de la Pierre du Niton à 373.687^{m}.

Pour l'altitude absolue du RPN, nous avons donc les valeurs obtenues successivement :

Déterminations barométriques [3] Delcross	1817	376.80 m
Déterminations géodésiques, hauteurs zénithales	1840	374.6
Nivellements. Carte suisse au 1 : 100 000e	1833	376.64
Atlas Siegfried	1868	376.86
Génie français. Bourdaloue	1862	374.052
Nivellement français. Lallemand	1890	373.687
Nivellement alsacien	1887	373.276

En 1890 nous sommes donc arrivés à ce résultat assez satisfaisant pour la cote absolue du repère de la Pierre du Niton :

Par la jonction avec le nivellement prussien		RPN = AA 373.276^{m}
Par la jonction avec le nivellement français		RPN = AA 373.687
	Moyenne	RPN = AA 373.481^{m}

mer Baltique à Swinemünde d'après la détermination de Seitz. Les derniers calculs ont établi cette différence :

à + 0.0531^{m} nivellement de l'Institut royal de Géodésie
+ 0.0659^{m} nivellement (revisé) de la Landesaufnahme.
moyenne + 55.6^{mm}

(*E. v. Drygalski*, ingénieur à l'Institut de Géodésie de Prusse, in litt. 5 janv. 1891).

(1) Procès-verbaux de la 31e séance de la commission géodésique suisse in Bull. Soc. Sc. nat. Neuchâtel XVI, suppl. p. 31.

(2) *Ch. Lallemand* in litt. 2 juillet 1890.

(3) J'ai ajouté 1.65^{m} au chiffre de Delcross qui donnait la hauteur de la nappe du Léman pour le transformer en altitude absolue de RPN.

L'écart entre les deux résultats n'est que de 41cm.

En donnant à RPN l'altitude absolue AA 373.5m nous sommes assurés de ne pas faire une erreur de 25cm.

D'après cette nouvelle valeur de la base de l'hypsométrie suisse, nous aurons donc une correction à apporter aux cotes absolues données dans les cartes fédérales. Nous aurons à retrancher de ces cotes absolues une valeur de 3.1m dans la carte au 1 : 100000e, atlas Dufour, et 3.4m dans la carte au 1 : 25000e, 1 : 50000e, atlas Siegfried.

Le général Dufour admettait que la nappe du Léman est à la cote RPN — 1.61m. Mes propres calculs établissent que le niveau moyen du lac pour la période 1818-1880 était RPN — 1.651m. La convention intercantonale du 17 décembre 1884 a fixé les extrêmes de variation normale du lac à RPN — 1.90 et RPN — 1.30m; la hauteur moyenne de l'avenir est donc RPN — 1.60m. Si, comme nous venons de le voir, RPN = AA 373.5m nous pouvons admettre pour l'altitude absolue du lac Léman 371.9m, soit en nombre rond 372m au-dessus du niveau moyen des mers européennes. (1)

Je donne ici l'altitude relative, rapportée au repère de la Pierre du Niton de quelques repères importants sur les rives du lac. J'en tire la valeur du registre (autographié) des repères du nivellement de précision de la Suisse et du registre du nivellement général de la France :

Genève.		Repère en bronze, colonne du limnimètre	RPN + 1.47m
Coppet.	NF. 11.	Poste de gendarmerie	3.62
Nyon.	NF. 12.	Ancienne douane	1.35
Rolle.	NF. 14.	Obélisque de l'île la Harpe	1.52
Morges.	NF. 15.	Eglise	2.02
Ouchy.	V. IV.	Poste de police	1.22
Lutry.	V. V.	Poids public	2.82
Cully.	NF. 70.	Monument Davel	0.68
Vevey.	NF. 71.	Colonne limnimétrique	0.49
Vernex.	NF. 72.	Perron de « l'Hôtel Suisse »	2.46
Chillon.	NF. 73.	Corps de garde du château	5.22
»		Sur le roc au pied de la fenêtre de la Du-	

(1) Pour l'usage des cartes suisses, il est nécessaire de se rappeler que le niveau moyen du Léman dans l'atlas Dufour est établi à 375.0m et dans l'atlas Siegfried à 375.3m.

	chesse, repère en bronze de M. Ch. Dufour (1)	RPN — 0.289m
Villeneuve.	NF. 74. Corps de garde des gendarmes	+ 0.74
St-Gingolph.	Repère sur le parapet aval du pont	12.628
Evian.	Repère rive gauche du pont des moulins	13.206
Thonon.	Repère angle S.-E. de l'hôtel de ville	52.048
Rives.	Sous Thonon, repère café Beau-Rivage	1.688

Voici enfin d'après M. L. Gonin (2) les diverses cotes employées pour le repère de la Pierre du Niton dans des documents officiels :

1° Plan Pichard 1823	AP = RPN + 5.523m
2° Nivellement de précision suisse Plantamour-Hirsch 1867	RPN = 0.000m
3° Système F. Burnier 1854, limnimétrie du Léman. E. Plantamour, F.-A. Forel.	(3)RPN = ZL + 3.00m
4° Général Dufour, carte fédérale. Originaux des cartes topographiques des cantons de Vaud et Genève. Cote terrestre des nivellements vaudois et genevois. F. Burnier, Vallée et Bureau topographique vaudois. (Nivellement Filhon. Dôle-Pierre du Niton)	RPN = 376.640m
5° Siegfried, atlas Siegfried. Carte Pictet. Chemins de fer J.-S. Bureau municipal de Lausanne. (Nivellement du Chasseral)	RPN = 376.860m
6° Commission intercantonale des eaux du Jura. Génie français (Nivellement Bourdaloue sur la Méditerranée)	RPN = 374.052m

IV. **Forme.**

La forme du Léman étudiée sur une carte géographique, indépendamment du relief, soit de la terre ferme qui l'entoure, soit du bassin

(1) D'après un nivellement de MM. Gonin et Guiguer de Prangins.

(2) Réplique de l'Etat de Vaud dans le procès du Léman, p. 90. Lausanne 1880.

(3) Par ZL (zéro du Léman) nous désignons, comme on le verra plus loin, l'étiage de la limnimétrie du Léman, conformément aux propositions faites en 1854 par le colonel F. Burnier.

qui le contient, est celle d'un croissant irrégulier, à cornes inégales ; la branche orientale est plus large et terminée en courbe plus arrondie que la branche occidentale qui va s'effilant et se rétrécissant en pointe vers Genève. La concavité du croissant regarde le sud.

L'axe du lac forme à peu près un arc de cercle de 35 $^1/_2$^{km} de rayon et de 120° d'ouverture dont le centre serait à 5^{km} du sud du Roc d'Enfer en Savoie.

La rive nord se rapproche sensiblement d'un arc de cercle de 32 $^1/_2$^{km} de rayon et de 145° d'ouverture, dont le centre serait situé à 1^{km} au N.-E. de l'ancienne Abbaye, vallée de Bellevaux. La rive sud est irrégulière et se prête difficilement à une description générale. De Villeneuve au fond du golfe de Coudrée elle est à peu près droite, légèrement concave, cette ligne étant interrompue entre Amphion et Thonon par le delta de la Dranse qui fait une saillie mousse de deux kilomètres environ. A partir de l'embouchure du Vion, au fond du golfe de Coudrée, la rive sud se relève au nord pour former la pointe d'Yvoire ; puis s'inclinant rapidement au sud-ouest, elle devient à peu près parallèle à la rive nord dont elle se rapproche insensiblement et qu'elle va rejoindre à Genève.

Le centre de figure du lac, c'est-à-dire le point par lequel une droite méridienne ou parallèle divise la superficie du lac en deux moitiés égales, est situé sur la ligne Préverenges-embouchure de la Dranse, à 2 $^3/_4$^{km} de la rive savoyarde.

Le Léman est peu découpé ; ses rives ne forment point de presqu'île ; les saillies de la côte sont peu proéminentes et ne se terminent nulle part en caps aigus. Ses golfes avancent peu dans les terres ; aucun d'eux n'a le caractère d'un fiord.

Le Léman ne possède aucune île naturelle. Ses seules îles sont de création artificielle sur des hauts-fonds, si l'on peut donner le nom d'île à l'îlot de Peilz près de Villeneuve, à la Roche aux Mouettes près de Clarens, à l'île de la Harpe devant Rolle.

En fait de récifs de roche en place je n'ai à citer que les Roches de Salagnon, deux récifs rocheux émergeant aux eaux moyennes à 75 et à 100^{m} du rivage, devant Burier, près Clarens.

Tous les autres récifs, comme entr'autres ceux de la pointe d'Yvoire et de la pointe de la Venoge, sont des blocs erratiques amenés par les glaciers.

V. **Division.**

Le Léman au point de vue géographique forme un seul lac continu et sans séparation ; mais il est parfois divisé par l'usage des riverains en deux parties, différentes par leur largeur, leur profondeur, la masse de leurs eaux, les caractères généraux de leurs rives et peut-être aussi par leur origine. Le détroit peu apparent de 3.4^{km} qui s'étend entre la pointe de Promenthoux sur la côte nord, et la pointe de Nernier en Savoie, sépare le Grand-lac et le Petit-lac.

Le Grand-lac s'étend depuis l'origine du lac vers la plaine du Rhône jusqu'au détroit de Promenthoux, ou à la barre de Promenthoux. (1) C'est un beau bassin très régulier dans sa structure et son relief, à axe légèrement recourbé suivant un arc regardant vers le sud : sa largeur assez uniforme varie de 8 à 14^{km}.

Le Petit-lac, désigné aussi quelquefois sous le nom de lac de Genève, du détroit de Promenthoux à l'émissaire du lac, est étroit et progressivement resserré. Sa largeur, qui est encore de 4^{km} devant Nyon, descend à quelques centaines de mètres près de Genève.

Les riverains appellent Haut-lac la partie orientale du Grand-lac, au-delà de la ligne Ouchy-Evian. L'extrémité du lac au-delà de Vevey est parfois désignée sous l'appellation impropre de fond du lac. (2) Le vaste golfe qui sépare la pointe de la Dranse de celle d'Yvoire porte le nom de la Grande Conche.

VI. **Dimensions.**

Longueur. — Une ligne droite étendue à vol d'oiseau entre les deux extrémités du lac, de Chillon à Genève, mesure 63.4^{km}. Mais cette ligne

(1) L'on désigne souvent ce détroit sous le nom de *détroit d'Yvoire*, en raison de la saillie que fait sur le Petit-lac la pointe d'Yvoire, vue de Thonon ou de Lausanne. J'ai moi-même, à tort, placé la séparation entre les deux parties du lac à ce que j'appelais *le détroit d'Yvoire* ou *la barre d'Yvoire*. La carte hydrographique levée en 1888-89 a montré que la barre est en réalité située sur la ligne qui joint la pointe de Nernier à la pointe de Promenthoux. Pour éviter cette confusion j'adopte pour ce détroit et cette barre le nom de Promenthoux qui ne peut prêter à aucune indécision.

(2) Ce même terme est souvent employé pour désigner la partie la plus reculée d'autres lacs, ainsi par exemple pour le lac Supérieur de l'Amérique du nord.

forme une corde de l'arc de cercle irrégulier dessiné par le Léman; elle passe en grande partie sur la terre ferme; elle exprime donc mal la longueur du lac.

Une ligne brisée qui, sur le domaine des eaux, exprime la plus courte distance entre les points extrêmes du lac, part de Grand-Champ, entre Chillon et la Tinière, rase les pointes de Meillerie, la Dranse, Yvoire, Nernier, Messery, Bellerive, et aboutit à l'entrée du port de Genève; elle mesure 69.3^{km}.

Si l'on suit le contour en arc de cercle du grand axe du lac on arrive à un chiffre plus élevé, plus exact, de 72.3^{km}. C'est le chiffre que je donnerai comme représentant la longueur vraie du lac Léman.

De l'entrée à la sortie du Rhône, la ligne des rivages a un développement de côtes de 95^{km} sur la rive nord, de 72^{km} sur la rive sud; ensemble 167^{km} de ligne de côtes.

Sur la ligne brisée suivie par les bateaux à vapeur qui doublent les pointes en pénétrant dans quelques golfes, la moitié de la longueur du lac est :

rive nord, près de Buchillon, entre St-Prex et Rolle, à la Pierre à Coulet.

rive sud, près de Corzent, à 2^{km} à l'ouest de Thonon.

Largeur. — La plus grande largeur sur une ligne normale à l'axe du lac, entre le golfe de Morges et Amphion, est de 13.8^{km}.

La superficie que nous allons indiquer, divisée par la longueur du grand axe, donne la largeur moyenne du lac qui est de 8.1^{km}.

Superficie. — La superficie totale du Léman mesurée par le planimètre sur la carte au 1 : 25 000e est de 582.36$^{km^2}$. Ce chiffre, calculé en 1890 par les ordres de M. A. Delebecque, ingénieur des ponts et chaussées, à Thonon, doit remplacer l'ancien chiffre de 577.86$^{km^2}$ de la commission hydrométrique (1) suisse qui l'avait fait mesurer en 1866 d'après la carte au 1 : 100 000e.

Le Grand-lac a une superficie (2) de	503.5$^{km^2}$
Le Petit-lac »	78.8

(1) Notice autographiée du bureau central de la Commission hydrométrique suisse. Berne, mai 1866.

(2) Ces chiffres ont été obtenus en décomposant la carte du lac et en pesant les deux moitiés. Cette méthode des pesées est très expéditive et suffisamment exacte

Le Grand-lac représente donc le 0.86 de la superficie totale du Léman, le Petit-lac seulement 0.14.

La superficie totale étant 582.36$^{km^2}$, cette surface est égale à celle d'un cercle de 13.6^{km} de rayon; ce rayon est moins fort que la largeur maximale du lac qui est de 13.8^{km}. Un lac circulaire de 13.6^{km} développé autour du centre de figure du lac aurait ses rives passant à Pully, Lausanne, Renens, Bussigny, St-Saphorin, Chardonnay, St-Livres, Rolle-Perroy, Jussy, Orcier, Vailly, la Vernaz, Chevenoz, Bernex, Thollon, Pully.

Le Léman n'est pas le plus grand des lacs de l'Europe centrale, car le Balaton, Plattensee, avec ses 690$^{km^2}$ de superficie le dépasse de plus de cent kilomètres carrés. (1) Il est le plus grand des lacs alpins et subalpins ; le lac de Constance qui vient après lui ne mesure que 467$^{km^2}$. Mais il est dépassé et de beaucoup en superficie par les grands lacs du nord de l'Europe, de la Russie et de la Suède.

Volume. — Le volume des eaux du Léman est de 88 920 millions $^{m^3}$ (2) ou en nombre rond 89 kilomètres cubes.

Pour évaluer le volume d'un lac dont la carte hydrographique n'est pas encore levée, j'ai proposé (3) de le comparer à un cône dont la base serait la superficie du lac et dont la hauteur serait la profondeur maximale. Un tel cône aurait pour le Léman un volume de 60 099 millions$^{m^3}$. Ce chiffre approximatif n'est que le 0.67 de la valeur réelle.

Cet énorme volume de 89 mille millions de $^{m^3}$ est la plus grande masse d'eau douce de l'Europe centrale. Elle est égale au volume d'une sphère de 2769^{m} de rayon, soit un peu plus d'une lieue de diamètre.

Profondeur moyenne. — La profondeur moyenne du lac obtenue en divisant son volume par la superficie est 152.7^{m}.

pour bien des évaluations. En l'appliquant à la superficie totale du lac sur la carte au 1 : 25 000e j'avais obtenu 581.1$^{km^2}$, chiffre qui ne diffère de celui de M. Delebecque que du 0.002.

(1) Le peu de profondeur du lac Balaton le ferait presque ranger dans le type des étangs.

(2) *Delebecque* 1890, d'après la carte au 1 : 25 000e. Pour apprécier l'exactitude de la méthode des pesées, je dirai ici que, en l'appliquant à une carte au 1 : 100 000e, j'étais arrivé à un chiffre de 89,700$^{m^3}$, qui ne diffère que du 0.01 du chiffre de M. Delebecque, obtenu par les procédés plus parfaits de la planimétrie sur une carte plus complète et à plus grande échelle.

(3) *F.-A. Forel.* Faune profonde des lacs suisses, p. 5.

Si je décompose le lac en ses deux parties, je leur trouve pour profondeur moyenne :

Grand-lac	172^{m}
Petit-lac	41^{m}

Quant au volume des deux parties du lac il peut être évalué à :

Grand-lac	86.8 milliards$^{m^3}$
Petit-lac	3.2 »

Le Petit-lac ne représente que le $^1/_{27}$ du volume du Grand-lac, ou le $^1/_{28}$ du lac dans son ensemble.

Profondeur maximale. — La profondeur maximale du lac est 309.7^{m}. Le Léman, avec ses 309^{m} de profondeur maximale, n'est pas le plus profond des lacs d'Europe; il est dépassé à ce point de vue par le Lario (lac de Côme) qui mesure 414^{m} et le Verbano (lac Majeur) 375^{m}. Il est le plus profond des lacs du versant septentrional des Alpes.

DEUXIÈME PARTIE

HYDROGRAPHIE

Dans cette partie hydrographique je décrirai le relief du bassin du lac, dans sa généralité et dans ses détails, sa constitution et son mode de formation, et j'étudierai successivement :

1° Les cartes hydrographiques du lac Léman ;
2° La méthode du lever hydrographique ;
3° La description générale du relief en creux du Léman ;
4° Les côtes du lac ;
5° La théorie géographique des côtes ;
6° Le sol du lac ;
7° La moraine sous-lacustre d'Yvoire ;
8° Les éboulements du mont.

I. — **Les cartes hydrographiques du Léman.**

L'histoire de nos connaissances sur le relief hydrographique du Léman nous montre successivement :

1° Quelques sondages isolés nous faisant connaître la profondeur de quelques points du lac : ceux de H.-B. de Saussure en particulier (1)

(1) *H.-B. de Saussure.* Voyage dans les Alpes, I p. 28 et 30. Neuchâtel, 1779.

qui, à l'occasion de ses mesures thermométriques, a constaté la profondeur du lac devant Genthod, Meillerie et Evian.

Dans les sondes de Saussure il y a une erreur de fait, inexplicable autrement que par une faute de transcription. Il donne au lac devant Meillerie ([1]) à 800 toises du bord (1560^{m}) une profondeur de 950 pieds (308^{m}) : en réalité dans cette localité le lac a une profondeur de 260^{m}. Devant Evian ([2]) à une demi-lieue du bord il n'a trouvé que 201^{m}, tandis qu'en réalité le lac y mesure 309^{m}. Les mêmes erreurs se retrouvent sur la carte qui accompagne son premier volume. Je présume qu'il y a eu faute de copie et qu'il a donné à Meillerie la profondeur trouvée devant Evian. Cette erreur de Saussure s'est propagée dans les souvenirs populaires, et nous avons beaucoup de peine à corriger dans le public la notion fermement ancrée que le lac a sa plus grande profondeur devant Meillerie.

2° La carte des sondes de H.-T. de la Bèche, ([3]) naturaliste anglais qui, du 15 septembre au 1er octobre 1819, fit sur le lac un voyage de sondages bathymétriques et thermométriques; il donna une cinquantaine de coups de sonde dans le Petit-lac et autant dans le Grand-lac. La carte qu'il a publiée permet de suivre le chemin qu'il a parcouru sur le lac et indique ainsi les profils qu'il a étudiés. Je ne citerai que ce qui se rapporte au Grand-lac, en désignant les escales qu'il a faites successivement : De Nyon à Thonon, à Morges, à Ouchy, à Meillerie, à St-Gingolph, à Vevey, à Chillon; puis de Vevey à Rolle en suivant l'axe longitudinal du lac, et de Rolle à Yvoire.

La carte de la Bèche au 1 : 200000e est bonne pour l'époque, mais dans le texte explicatif il n'est donné aucune indication sur la manière dont le point a été relevé. Quant à l'exactitude des sondages, elle était à peu près suffisante; la plus grande profondeur qu'il ait trouvée devant Evian était 164 brasses, soit 300.1^{m}, ce qui est de 9 mètres trop faible pour la profondeur maximale du lac : à supposer, ce qui est probable, qu'il ait atteint la plaine centrale du lac, son erreur aurait été de 3 °/₀. Cette carte, la seule que nous ayons possédée jusqu'à ces dernières années, donnait une idée assez juste du relief du lac, et celui qui savait ne pas lui demander trop de détails ou trop de

([1]) Loi cit. § 44.
([2]) Loi cit. § 46.
([3]) *H.-T. de la Bèche,* sur la profondeur et la température du lac de Genève. *Bibl. univ.* Sc. et arts XII, 118, Genève 1819.

précision en tirait des notions très satisfaisantes. Toutes mes premières études se sont fondées sur la carte de la Bèche, et je n'ai pas, de son fait, commis de trop grosses erreurs.

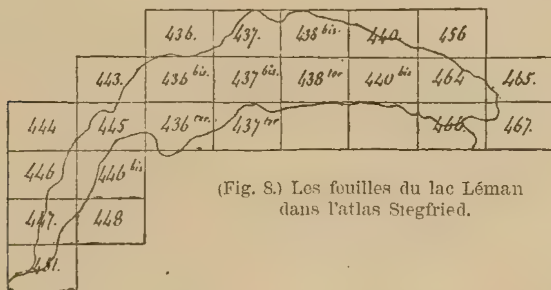
Ce sont les sondes de la Bèche qui sont inscrites dans la carte vaudoise au 1 : 50 000e.

3° En juillet 1846, le prof. Ch. Martins de Montpellier (1) essaya dans le lac Léman son appareil de sondage, et trouva les profondeurs suivantes :

à 4km au large de Lutry	304m	de profondeur.
à 60m au devant de Chillon	64m	»
à 400m W.-S.-W. de Chillon	78m	»

4° La carte du Petit-lac, ou lac de Genève, a été établie de 1872 à 1876 par le major Ed. Pictet-Mallet de Genève, au moyen d'un très riche réseau de sondages exacts. Cette belle carte, très détaillée, ne comprend que la partie du lac qui s'étend de la ligne Coppet-Hermance jusqu'à la sortie du Rhône à Genève; elle a été publiée en 1877 au 1 : 12 500e avec courbes isohypses, équidistantes de 5m. Un texte explicatif a été donné en 1875 dans les Archives. (2)

5° La carte hydrographique de l'atlas Siegfried, au 1 : 25 000e. Elle a été levée par divers ingénieurs et à diverses reprises (fig. 8).



(Fig. 8.) Les feuilles du lac Léman dans l'atlas Siegfried.

a En 1873, M. Ph. Gosset, du bureau topographique fédéral, dirigé alors par le col. Siegfried, a levé les feuilles 438 *bis*, 438 *ter*, 440 et 440 *bis*, soit la partie du lac de St-Saphorin à St-Sulpice et de St-Gingolph à Evian. Il a donné pour cela 1450 coups de sonde, avec la

(1) *Ch. Martins.* Description d'un appareil de sondages. Arch. de Genève, août 1866.

(2) *Ed. Pictet.* Note sur la carte du lac de Genève. Arch. de Genève LII, 15, 1875.

sonde de soie appartenant à l'Etat de Zurich. Ces 4 feuilles ont été publiées en première édition en 1874, avec courbes isohypses équidistantes de 10 mètres.

Une revision de cette partie jusqu'à la frontière suisse a été faite en 1886 sous la direction du col. J.-J. Lochmann, par M. J. Hörnlimann, ingénieur du même bureau; il a reconnu d'assez graves erreurs du lever primitif; (1) celles-ci doivent être attribuées essentiellement à l'emploi par M. Gosset d'une sonde très élastique en fil de soie, tandis que M. Hörnlimann a employé un fil d'acier dont le coëfficient d'élasticité a été déterminé avec le plus grand soin.

b Les feuilles du Haut-lac, à l'est de St-Saphorin et St-Gingolph, soit les feuilles 456, 464, 465, 437 *bis* et 467 de l'atlas, ont été levées dans l'été de 1885 par M. J. Hörnlimann.

c Les feuilles 436, 436 *bis*, 437, 466, soit de St-Sulpice à Rolle, ont été levées par le même ingénieur en automne 1888.

d Les feuilles 443, 445, 446, soit de Rolle à Coppet, ont été levées par M. Hörnlimann au printemps de 1889.

e En mai 1889 il a fait de même la revision des feuilles 446 à 451, déjà levées en 1874 par le major E. Pictet.

f Enfin les feuilles 446 *bis*, 436 *ter*, 437 *bis* et *ter*, 438 *ter*, 440 *bis*, soit toutes les eaux françaises depuis St-Gingolph à Hermance, ont été levées en 1887 et 1888 sous la direction de M. Delebecque, ingénieur des ponts et chaussées de l'arrondissement de Thonon, par MM. Faletti, Garcin et Magnin, agents des ponts et chaussées.

Le nombre des coups de sonde donnés pour l'établissement de cette carte a été :

Par M. Ph. Gosset.	1450
» Hörnlimann	6167
» Delebecque et ses agents .	4338
Ensemble	11955

soit en moyenne 20 sondages par kilomètre carré.

Ces levers forment la base de la carte hydrographique du lac Léman, qui a été dessinée en une feuille à l'échelle originale. J'ai eu

(1) C'est ainsi que la profondeur maximale trouvée en 1873 par 334^m s'est trouvée trop forte de plus de 24^m, elle n'est en réalité que 309.7^m; c'est ainsi que les deux entonnoirs de 9 et de 19^m au-dessous de la plaine centrale qui étaient figurés dans la première édition des feuilles 438 *bis* et 438 *ter*. (Cf. *F.-A. Forel.* Carte hydrogr. du lac Léman. Arch. Genève LII, 9, 1875) ont disparu dans la carte revisée.

le plaisir de la présenter à la Société helvétique des sciences naturelles dans sa session d'août 1890. (1)

La carte hydrographique du Léman est ou sera publiée :

1° En réduction photo-lithographique de la carte d'ensemble originale à l'échelle de 1 : 50 000e, par les soins du bureau topographique fédéral.

2° A l'échelle du lever original au 1 : 25 000e dans l'atlas Siegfried, feuilles 436, 436 *bis* et *ter*, 437, 437 *bis* et *ter*, 438 *bis* et *ter*, 440, 440 *bis*, 443, 445, 445 *bis*, 446, 447, 448, 451, 456, 464, 466, 467. Le relief est figuré par des courbes isohypses (d'égale altitude) équidistantes de 10m. Dans les parties intéressantes, des courbes de 5m d'équidistance sont intercalées. Les cotes d'altitude absolue sont calculées d'après la donnée que le repère de la Pierre du Niton est à l'altitude de 376.86m. Nous avons vu que l'altitude absolue de ce repère doit être abaissée à 373.5m ; il y a donc une correction générale de — 3.4m à apporter à toutes les cotes de cette carte.

3° Dans une carte spéciale que prépare M. l'ingénieur Delebecque au 1 : 50 000e avec isobathes équidistantes de 10m, le niveau moyen étant RPN — 1.56m.

4° J'en ai tiré une carte au 1 : 100 000e avec isobathes (courbes de même profondeur) équidistantes de 25m rapportée au niveau moyen du lac adopté pour l'établissement de la carte soit à RPN — 1.56m. J'ai obtenu de M. le colonel Lochmann l'autorisation de faire reproduire sur l'original des cartes suisses de l'atlas Dufour le dessin des côtes et d'y introduire la figure du relief du lac. Le travail lithographique a été fait par MM. Kümmerly frères à Berne. Je le joins à ce volume.

5° M. A. Delebecque en a tiré une carte au 1 : 150 000e avec isobathes de 25m sous le niveau moyen RPN — 1.56m. Elle a été publiée avec un texte explicatif dans les *Annales des ponts et chaussées de France.*

II. Méthode du lever hydrographique.

Les ingénieurs du bureau topographique fédéral, appelés successivement à dresser les cartes hydrographiques des lacs suisses, ont porté

(1) Arch. de Genève XXIV, 401, 1890.

à un haut degré les méthodes de sondage et de lever de ces cartes. Je crois utile de décrire ici leurs procédés, qui ont été appliqués dans toute leur perfection pour le lever de la carte du Léman, au 1 : 25 000e (atlas Siegfried) par M. J. Hörnlimann, ingénieur du bureau topographique fédéral dans les eaux suisses, et par M. A. Delebecque et les agents du bureau des ponts et chaussées de l'arrondissement de Thonon, pour les eaux françaises.

L'opération (1) du lever de la carte se décompose pour chaque point en deux manœuvres, la mesure de la profondeur de l'eau, ou le sondage, et la détermination de la position du point.

Pour le sondage, les ingénieurs suisses emploient actuellement un fil d'acier de 0.8mm de diamètre, de la fabrique Felten et Guillaume, à Mülheim sur le Rhin. Ce fil possède une force de traction de 100kg à la rupture. Avec un si petit diamètre, 300m d'un tel fil représentent une superficie de 75dm2 seulement; cette surface est lisse et les frottements dans l'eau sont très faibles.

A l'extrémité libre du fil est attachée une tringle de fer qui traverse un ou plusieurs boulets de fonte. Pour les faibles profondeurs un poids de 7kg est amplement suffisant; pour les fonds de 150m et plus, on y ajoute un second boulet de 3kg, ce qui porte à 10kg le poids du plomb de sonde.

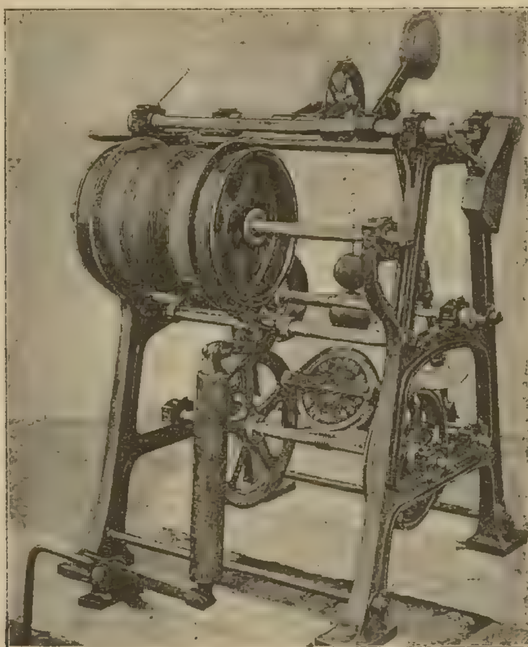
Le fil s'enroule sur le tambour d'un treuil établi d'après les dessins de M. l'ingénieur Haller de Berne (fig. 9). C'est un solide bâti de fonte qui porte le tambour, avec ses manivelles, le compteur et les poulies de renvoi. Le tambour est actionné par une manivelle, avec un ou deux engrenages, suivant le poids du plomb de sonde; un seul homme suffit à la mettre en mouvement. Le tambour porte un frein puissant pour modérer ou arrêter la descente de la sonde. Les poulies au nombre de trois dirigent le fil en dehors du bateau et le laissent librement tomber dans l'eau. Une de ces poulies est calibrée de telle manière que la circonférence de sa gorge soit exactement d'un mètre. Son axe s'engrène avec un appareil à compteur qui indique le nombre de tours de roue, et de dixièmes de tour, permettant ainsi d'apprécier la profondeur à un décimètre près. Un ingénieux système de bascule fait désembrayer la roue du compteur à l'instant où le plomb de sonde,

(1) *J. Hörnlimann,* Ueber Seetiefen messungen. Schw.-Bauzeitung. Bᵒ VII 1886.

en touchant le fond, cesse de peser de son poids sur la poulie équilibrée autour de laquelle s'enroule le fil.

Dans le littoral, les très faibles profondeurs sont mesurées à l'aide d'une latte graduée qu'on plonge verticalement dans l'eau.

La barque qui porte l'appareil à sondages, *le Sondeur*, est du type de la *cochère*, bateau plat, non ponté, sauf une petite chambrette à la proue ; elle a deux mâts dont l'un est voilier et porte une voile latine, l'autre est une règle graduée qui sert de mire à la stadia et en même temps de mât pour les signaux. Quatre avirons servent de moteur au



(Fig. 9.) Appareil à sonder du bureau topographique fédéral.

Sondeur. L'équipage est composé de l'ingénieur hydrographe, d'un mécanicien et de quatre rameurs.

Le bateau est dirigé sur la ligne des profils par un ingénieur établi sur la grève, qui vise le navire à l'aide d'une alidade et le ramène sur l'alignement par un jeu de signaux convenus.

L'établissement du point se fait par deux méthodes différentes, suivant la distance à la rive.

Pour les faibles distances, inférieures à 1400^m (à 1500^m par un bon éclairage) la position du bateau est déterminée par l'ingénieur à la côte à l'aide d'une visée de l'alidade à stadia. A l'appel d'un signal du *Sondeur* qui arbore une flamme convenue, l'opérateur de la rive vise la direction au moyen de l'alidade et la trace sur sa planchette ; et en même temps il apprécie la distance par une lecture à la stadia des marques équidistantes peintes sur le mât du bateau. Direction et distance connues, il peut immédiatement reporter sur la planchette la position de la barque. En même temps l'ingénieur à bord du *Sondeur* apprécie la direction à la rive par un angle mesuré au sextant entre deux points trigonométriques de la terre ferme ; comme il suit sur sa carte la position du profil où il travaille, il peut établir approximativement la position du point sondé, quitte à la vérifier plus tard sur la planchette de l'opérateur à la côte.

Pour les distances supérieures à 1400^m, la mesure à la stadia est trop insuffisante. L'ingénieur à terre se borne à marquer sur la planchette la direction exacte du bateau au moment du sondage ; la distance et la position définitives du point sont déterminées à bord du *Sondeur* par l'entrecroisement de deux ou trois angles mesurés au sextant sur des signaux trigonométriques connus.

Le degré d'exactitude de ces diverses opérations est plus que suffisant, et, d'après l'estime de M. Hörnlimann, l'incertitude dans la position du point ne dépasse pas les erreurs inévitables qu'on peut faire dans le dessin lui-même de la carte.

L'ingénieur qui travaille sur le bateau trace sur la carte, immédiatement après chaque sondage, la position approximative du point sondé. En en comparant la profondeur avec celle des points voisins, il peut juger si le sondage mérite confiance, ou bien, s'il y a des accidents importants du sol il peut multiplier les coups de sonde pour en étudier les détails.

Le lever d'une carte hydrographique se fait dans des conditions tout autres que l'établissement d'une carte orographique terrestre. Par le fait de l'opacité absolue de l'eau sous une épaisseur de quelques mètres, l'ingénieur hydrographe ne voit pas le sol dont il doit découvrir les inégalités ; il agit à l'aveugle. Les ingénieurs suisses ont adopté pour programme un réseau normal de profils équidistants, régulière-

ment distribués, mais ils ont reçu pour consigne de multiplier les coups de sonde en dehors des profils sitôt que la complication du relief l'exige.

Quant à l'établissement lui-même de la carte, il est procédé comme suit. Une série de profils principaux distants de 500 mètres sont tracés normalement à la ligne générale de la côte, en travers du lac ; sur ces profils, des points sont sondés tous les 50^{m} pour les faibles profondeurs, tous les 100^{m} pour les profondeurs moyennes, tous les 200, les 300, les 500^{m} pour les grands fonds du lac. Près de la rive des profils intermédiaires sont étendus jusqu'à la distance de mille ou quinze cents mètres en avant. Quand une partie devient intéressante, le nombre des points à sonder est multiplié à la discrétion de l'ingénieur hydrographe.

C'est ainsi que dans la plaine de grande profondeur du Léman le nombre des coups de sonde ne dépasse guère 5 par kilomètre : tandis que devant les bouches du Rhône j'ai compté sur la carte d'Hörnlimann jusqu'à 110 coups de sonde dans un kilomètre carré.

Nous avons dit que le nombre total des sondages qui ont servi au lever de la carte du Léman a été de 11 955, ce qui représente près de 21 points par kilomètre carré.

Les cartes hydrographiques suisses sont publiées à l'échelle du 1 : 25 000e dans l'atlas Siegfried ; le relief du sol est dessiné par des courbes isohypses faisant suite à celles du terrain émergé, rapportées au niveau de la mer. Je rappelle ici la correction de — 3.4^{m} qui doit leur être apportée par suite des erreurs faites à l'origine dans l'établissement de l'altitude absolue du repère de la Pierre de Niton, base de l'hypsométrie suisse. Ces courbes isohypses ont une équidistance de 10^{m}. Pour les points particulièrement intéressants des courbes intermédiaires sont dessinées en pointillé fin ; les courbes de chaque centaine de mètres se distinguent parce qu'elles sont dessinées en pointillé grossier. Quelques cotes absolues sont indiquées sur les points saillants au-dessus ou au-dessous du niveau général, quand leur relief n'est pas suffisamment donné par les courbes.

Il est un perfectionnement dans l'établissement de ces cartes que j'ai proposé en 1890, [1] mais que je n'ai pas encore pu faire adopter. Je le recommande à l'attention des hydrographes.

[1] Protokolle der Vollzugskommission der fünf Uferstaaten für die Herstellung einer Bodenseekarte, Ve Sitzung. Lindau, mai 1890. p. 10.

Pour la bonne utilisation d'une carte hydrographique il est important de savoir quels sont les points sondés ; la confiance que l'on doit accorder aux courbes isohypses dépend de cette connaissance. En admettant que l'attention la plus scrupuleuse ait été apportée au tracé des courbes, il est certains cas où l'on pourrait modifier notablement ce tracé en satisfaisant également aux résultats des coups de sonde. D'une autre part si les sondages ont été très multipliés sur une partie délicate, le relief tracé par les courbes a une grande sûreté ; si les coups de sonde sont peu nombreux, des inégalités importantes peuvent avoir échappé à l'hydrographe. Enfin un coup de sonde donné très près d'une courbe isohypse assure à la position de cette courbe une parfaite sécurité ; si le sondage est à une plus grande distance de la courbe, celle-ci devient plus incertaine. Suivant les circonstances, les conclusions que le géologue ou le géographe sont autorisés à tirer du dessin de la carte peuvent être notablement différentes.

Or il est impossible dans la publication d'une carte d'indiquer tous les points sondés avec leur cote d'altitude; cela chargerait trop le dessin et cela serait trop déplaisant à l'œil. J'ai proposé de satisfaire à la fois aux exigences esthétiques du dessin et aux désideratas de ceux qui ont à étudier ces cartes, en signalant chaque coup de sondage par un simple point noir, sans inscription de cote. La cote de ces points pourrait se déduire par interpolation entre les courbes isohypses voisines, et celui qui aurait à étudier les détails de la carte, saurait immédiatement quelle confiance il doit attacher aux courbes tracées; quitte à lui à retrouver, sur la minute originale de la carte, la cote exacte des points dont l'importance justifierait une pareille recherche. J'estime ce perfectionnement nécessaire pour les cartes hydrographiques dont le lever est fait à l'aveugle, sans que l'ingénieur vise lui-même les détails de fond ; l'apparence extérieure des cartes en souffrira peut-être un peu, mais leur valeur intrinsèque en sera notablement accrue.(1)

Quelle est l'exactitude que l'on doit attribuer aux cartes hydrographiques ? Quelle est la confiance que l'on peut leur accorder ? Cette

(1) J'ai le plaisir d'apprendre que M. le colonel Lochmann, chef du bureau topographique fédéral, a bien voulu suivre ce procédé pour la carte hydrographique du Léman, en reproduction photo-lithographique au 1 : 50 000e. Cette carte, destinée à l'étude scientifique et technique, satisfera à tous les désideratas que nous pouvons exprimer.

question a une haute importance pour celui qui a à les utiliser et qui doit, d'après le relief dessiné sur la carte, tirer des conclusions sur la nature des accidents qui y sont représentés. Il y a lieu à ce point de vue de distinguer trois opérations différentes, à savoir :

La tâche de l'ingénieur hydrographe. Le degré d'exactitude de la carte tient à la précision avec laquelle le lever a été fait. Les erreurs possibles dans le sondage viennent :

a De la correction de l'appareil dont tous les détails doivent être vérifiés avec soin ; en particulier le diamètre exact de la poulie d'enregistrement de la profondeur a une importance capitale. Sous ce rapport nous pouvons dire que les deux appareils employés pour l'établissement de la carte du Léman, celui de M. Hörnlimann et celui de M. Delebecque, ont été mis simultanément en action sur la plaine centrale du Léman par 309^{m} de profondeur ; les différences observées entre les résultats des deux instruments n'ont pas dépassé 0.3^{m}. De ce fait l'exactitude de la carte du Léman est presque parfaite.

b Des erreurs de lecture, et des erreurs dans la position des points. L'exactitude dépend de l'attention et de l'habileté de l'ingénieur.

c Des erreurs de mesures dues à la dérive du bateau pendant le sondage ; entraîné par le vent et les courants du lac, le bateau peut se déplacer notablement entre l'instant où la profondeur est mesurée et celui où le point est déterminé. Ou bien, par le fait de la dérive, le fil de sonde peut n'être pas parfaitement vertical ;[1] son inclinaison, qui ne peut se vérifier que dans les 2 ou 3^{m} où l'œil suit la ligne, échappe à l'observation de l'opérateur. A ce point de vue il convient d'éliminer tous les sondages faits par des jours de vent, ou de forts courants sur le lac.

[1] Avec les anciennes lignes en corde de chanvre ou de soie, dont le diamètre était relativement fort et la surface rugueuse, les frottements sur l'eau n'étaient nullement négligeables ; la sonde pouvait faire une courbe de chaînette et, alors même qu'elle était verticale aux yeux de l'opérateur dans sa partie supérieure, elle pouvait indiquer une profondeur notablement trop forte. Cet inconvénient n'est plus à craindre avec les lignes de fil métallique, qui ont moins d'un millimètre de diamètre et dont la surface est parfaitement polie ; une tension suffisante permet d'en assurer la rectitude absolue. Mais il reste toujours la possibilité d'un écart de la verticalité, et l'erreur de ce fait est loin d'être négligeable. Pour une longueur de 300^{m} une déviation de la verticalité entraîne une erreur en trop dans la profondeur :

Ecart de	1°	erreur en trop de profondeur	0.05^{m}.
»	5°	» »	1.15^{m}.
»	10°	» »	4.56^{m}.

Pour que l'opérateur puisse reconnaître immédiatement les erreurs trop grossières, le mieux est qu'il trace autant que possible sa carte à mesure qu'il procède aux sondages; en dessinant sur place, d'une manière provisoire, cela s'entend, les courbes isohypses, il voit bientôt celles dont la marche est anormale, et les points qui demandent à être vérifiés. La répétition immédiate d'un sondage est peu dispendieuse ; une répétition ultérieure est le plus souvent presque inexécutable.

Mais même en admettant la plus grande attention et la meilleure conscience chez l'opérateur, celui-ci n'en est pas moins dans une situation fort délicate. Il agit à l'aveugle ; il ne voit pas le fond sur lequel il travaille, je ne puis me lasser de le répéter, et sa sonde peut négliger certain détail d'importance majeure, qu'il aurait mesuré s'il avait vu le sol à découvert. C'est là qu'il faut à l'ingénieur du tact, une véritable seconde vue qui lui fasse deviner les accidents possibles entre les points dont il a la profondeur exacte. Sous ce rapport l'expérience acquise par l'opérateur est d'une importance souveraine ; un vieux maître sondeur, comme Hörnlimann, jouit d'avantages inappréciables, car il comprend mieux avec quelques coups de sonde isolés les allures du fond que ne le ferait un hydrographe novice avec des centaines de sondages.

La tâche du dessinateur consiste à tracer d'une manière intelligente les courbes isobathes entre les points dont la profondeur est donnée par les sondages. L'interpolation entre les points de sonde indique la position plus ou moins certaine des courbes en quelques lieux, mais entre ces lieux leur tracé n'est que probable. Quand un accident du sol, un ravin, une colline saillante se retrouvent sur plusieurs profils, il n'est pas difficile d'en donner le relief. Mais quand un seul point de sonde est là pour signaler un accident, quand il manque les points voisins qui en affirmeraient l'authenticité, nous recommandons au dessinateur la plus grande prudence. Il vaudrait mieux négliger dans le tracé un accident du sol que de figurer un relief auquel le lecteur attribuerait peut-être une grande importance, et qui ne serait que le fait d'une erreur de sondage. — Je citerai comme exemple les deux entonnoirs que les feuilles 438 *bis*, 1[re] édition, et 438 *ter* de l'atlas Siegfried avaient dessinés sur la plaine centrale du lac Léman. L'un et l'autre établis sur un seul coup de sonde n'ont pas été retrouvés dans des sondages plus serrés et plus précis de la revision ultérieure de la carte. Si le dessinateur de cette carte y avait mis la prudence que je

recommande ici, il m'aurait évité la longue dissertation dont je me suis rendu coupable à propos de ces deux dépressions imaginaires, dans mon étude sur la carte hydrographique du lac. [1]

La tâche du lecteur de la carte hydrographique est aussi difficile; il y a une véritable étude à faire pour nous déshabituer des notions de confiance absolue que nous avons dans l'usage des cartes hypsométriques terrestres. Au premier abord nous sommes tentés d'attribuer aux courbes isohypses sous-lacustres la même certitude qu'à celles d'une carte terrestre; chaque inflexion de ces courbes nous paraît également précise et assurée. Il n'en est rien; le tracé des courbes est seulement probable; il n'est pas certain. Il est incontestable que, dans ses grandes lignes, le relief figuré par la carte est parfaitement sûr, et que nous pouvons en tirer des conclusions générales de haute valeur; il est incontestable aussi que certaines parties, même très accidentées, qui ont été criblées par de nombreux coups de sonde, offrent le même degré de certitude. Mais d'autres détails qui ne sont signalés que par un ou deux sondages n'ont pas du tout la même précision; leur tracé n'est que probable, approximatif. Malheureusement avec les procédés actuels de publication de cartes qui ne donnent pas tous les coups de sonde, il est impossible de juger entre les parties qui sont absolument certaines et celles qui ne le sont pas. Pour arriver à une notion assurée, il est nécessaire d'avoir recours aux minutes originales.

Je me hâte d'ajouter que pour ce qui regarde la carte du lac Léman, elle a été levée avec tant de soins, les ingénieurs suisses et français, qui y ont consacré tant de peine, ont multiplié les sondages avec tant de conscience et d'intelligence dans toutes les parties difficiles et douteuses, que nous pouvons lui attribuer la plus grande valeur d'exactitude, et nous fier en toute sécurité aux détails qui y sont figurés. Après une étude longue et attentive de notre belle carte, je puis déclarer que je n'ai pas trouvé un seul point du relief figuré qui m'inspirât de l'inquétude ou de l'incertitude.

Avant d'aborder l'étude générale de la carte du lac j'ai encore deux points à signaler.

Le premier regarde l'appellation à donner aux courbes horizontales

(1) Archives de Genève, LII, p. 9, sq. 1875.

équidistantes qui figurent le relief. Dans les cartes de l'atlas Siegfried, ce sont des courbes isohypses, soit de même altitude, rapportées au niveau de la mer; l'on est parti de la supposition que le repère de la Pierre du Niton est à l'altitude 376.86^m. Comme nous l'avons dit il y a lieu d'apporter à cette altitude et par conséquent à celle de chacune des courbes isohypses qui en sont déduites une correction de — 3.4^m. Les isohypses de l'atlas Siegfried ont une équidistance de 10^m. Pour ma description je me servirai de préférence des courbes isobathes soit courbes d'égale profondeur rapportées au niveau moyen du lac. Ma carte au 1 : 100 000e est établie sur ce système avec équidistances des isobathes de 25^m.

Le second point est le niveau moyen du lac qui a servi à la détermination des profondeurs, soit à l'établissement des courbes isobathes. Ce niveau est celui admis par les ingénieurs suisses et français, 1.56^m au-dessous du repère de la Pierre du Niton (RPN — 1.56^m) soit à l'altitude absolue 375.3^m quand on donne à RPN la cote 376.86^m. Le plan du niveau RPN — 1.56^m diffère de trop peu du niveau moyen des eaux du lac, [1] lequel est du reste variable suivant l'état des débouchés du Rhône de Genève, pour que j'aie songé à m'écarter de cette valeur qui a passé depuis longtemps dans l'usage général.

III. **Le relief en creux du lac Léman.**

Pour utiliser la carte hydrographique, à l'échelle du 1 : 25 000e, que nous devons aux ingénieurs suisses et français, je pourrais faire de deux manières la description du relief du lac. En premier lieu d'une manière empirique en étudiant simplement les profils longitudinaux et transversaux. En second lieu d'une manière systématique en divisant le relief en régions et en cherchant à les caractériser. Pour éviter des double-emplois et pour simplifier, je m'en tiens à la seconde méthode. Le lecteur pourra retrouver la plupart des faits que j'ai à décrire ici dans la carte au 1 : 100 000e avec isobathes de 25^m qui accompagne ce volume; mais il ne doit pas oublier que les détails précis ont été tirés de la carte originale à l'échelle de 1 : 25 000e avec équidistance des courbes de 10^m qui a servi de base à cette étude.

[1] Depuis la convention intercantonale de 1883, ce niveau moyen est RPN — 1.60^m.

Il y a lieu avant tout de séparer nettement dans le lac deux régions, la région littorale et la région profonde. La région littorale que je limiterai à la courbe isobathe de 25m (ou isohypse de 350m), est fort compliquée et très intéressante. Sa structure est la résultante du jeu alternatif de l'érosion des rives, de l'alluvion des affluents, de l'action des vagues. Elle mérite une étude attentive, dans laquelle nous aurons à considérer aussi bien la nature et la structure du sol que son relief. Je lui consacrerai un paragraphe spécial.

Ici je me borne à constater que sa largeur et son importance sont fort différentes d'une région à l'autre du lac. Sur les côtes rocheuses et à talus inclinés comme celles de Lavaux et la rive de Savoie, du Bouveret à Evian, sa largeur est nulle ou très faible. Ailleurs, en particulier devant la plaine du Rhône et près de Genève, elle atteint une étendue considérable et dépasse même un kilomètre de largeur. J'aurai à expliquer la raison de ces différences.

Je commencerai par la région profonde.

En laissant donc de côté pour le moment le littoral et en me limitant ici à la région profonde, je constate tout d'abord que le lac, au point de vue de son relief comme dans sa forme extérieure, se divise tout naturellement en deux parties, le Grand-lac et le Petit-lac. Je les étudierai successivement.

1° *Le Grand-lac.*

La partie orientale du Léman, depuis les bouches du Rhône jusqu'au détroit de Promenthoux, est un bassin unique et indécomposable; il n'est point séparé en cuvettes distinctes; aucune barre ne le découpe ni dans sa longueur ni dans sa largeur. Pour le décrire je considérerai successivement le plafond du lac et ses talus.

Les talus d'un lac sont les bords immergés du bassin, plus ou moins inclinés, qui, partant de la rive, aboutissent à la plaine des grandes profondeurs ou plafond du lac.

Le plafond du lac est la plaine plus ou moins égale qui constitue le fond du bassin. Etant donnée la forme allongée du Léman, nous pouvons, indépendamment de toute notion sur son origine, le comparer à une vallée. Le plafond du Léman sera donc le thalweg de la vallée. (1)

(1) Le plafond d'un lac n'est pas nécessairement un thalweg : ainsi les plafonds des lacs de cratères, ceux des chotts du Sahara, etc., ne sont ni des fonds de vallées d'érosion, ni des fonds de vallées de plissement.

Nous allons étudier ces deux parties, d'un coup d'œil général, en négligeant d'abord les accidents locaux sur lesquels nous reviendrons plus tard.

Les talus. Dans le Grand-lac les talus sont fort diversement inclinés. Dans le Haut-lac ils ont leur maximum de pente dans la région orientale ; à l'occident du profil Ouchy-Evian leur déclivité est beaucoup plus douce. En même temps leur hauteur varie; elle dépend de la profondeur du plafond dans la région considérée; elle est moins considérable aux deux extrémités du bassin, elle est à son maximum dans la région centrale.

Un talus peut être constitué ou bien par des parois rocheuses ou bien par des éboulis. Dans le premier cas il peut présenter toutes les irrégularités de murailles verticales, de terrasses, d'escaliers, de ressauts ou de replats dus aux accidents des rochers. Dans le second cas sa pente a une courbe régulière; la déclivité est à son maximum dans les parties supérieures et vient en s'adoucissant se rejoindre avec la plaine horizontale du plafond.

Les talus en éboulis peuvent encore différer suivant la nature des éboulis. Ou bien ce sont des alluvions meubles dont les matériaux désagrégés s'étalent sur le talus en se dispersant suivant la grosseur des fragments ; alors la pente est très régulière. Ou bien ce sont des terrains glissant en masse, et alors la pente est plus irrégulière et plus inégale. Nous allons trouver des exemples de ces divers types.

Le Léman ayant la forme d'une vallée, ses talus peuvent se diviser en talus terminaux et en talus latéraux. Nous aurons donc :

Le talus terminal oriental, le long de la plaine du Rhône;

Le talus terminal occidental aboutissant à la barre de Promenthoux.

Ces deux talus terminaux seront plus utilement décrits quand je traiterai du plafond du lac; ils sont en effet l'origine et la fin du thalweg du Grand-lac.

Le talus latéral septentrional, le long de la côte suisse, commence à Villeneuve et se termine à la pointe de Promenthoux.

Le talus latéral méridional, le long de la côte savoyarde, commence au Bouveret et se termine à la pointe d'Yvoire.

Les allures des deux talus latéraux sont à peu près les mêmes. L'un et l'autre sont plus inclinés, très inclinés même, dans la partie

orientale, en pente beaucoup plus douce dans la partie occidentale du Grand-lac. Aboutissant l'un et l'autre au plafond du lac, leur hauteur suit les mêmes variations que la profondeur de celui-ci; elle n'est que de 75^{m} à leur origine sur la plaine du Rhône; elle atteint progressivement 300^{m} vers le milieu de la longueur du Grand-lac, à Ouchy-Evian, pour décroître progressivement jusqu'à la barre de Promenthoux où elle n'est plus que de 60^{m}.

Le plafond du lac étant dans la partie occidentale du Grand-lac rejeté sur la côte de Savoie, le talus latéral méridional est plus incliné que le septentrional. Cela est surtout apparent entre les profils Ouchy-Grande Rive et Aubonne-Thonon.

En général la pente du talus est assez régulière; il n'y a que peu de ressauts et de terrasses; celles-ci ne sont que locales. Aucune d'elles ne représente un niveau, horizontal ou incliné, reconnaissable sur l'ensemble du lac ou sur une notable partie du talus; il n'y a donc pas trace d'une ancienne ligne de rivages à un niveau inférieur à la nappe actuelle du lac. Nous pouvons en déduire une notion importante pour l'histoire ancienne du lac : Depuis que la vallée du Léman est occupée par le lac, la hauteur de ses eaux n'a jamais été, pendant un temps suffisant pour produire des atterrissements reconnaissables, à un niveau plus bas que le plan limite inférieure de la région littorale.

La pente moyenne des talus, leur largeur et leur hauteur totale au-dessus du plafond du lac sont données dans le tableau suivant. Là où il y a des inégalités de pente j'indique la pente maximale. Là où il y a des deltas saillants je prends, pour mon point de départ à la rive, la ligne générale des côtes et non la pointe basse alluviale. Autant que possible j'ai suivi la ligne de plus grande pente. J'ai laissé les talus des deltas pour une étude ultérieure.

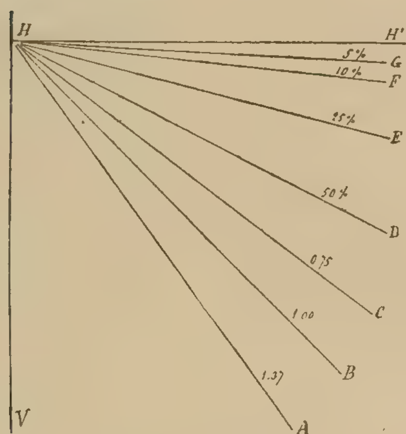
	Largeur du talus.	Hauteur.	Pente moyenne.	Pente maxim.
Côte suisse.	m.	m.		
Chillon,	75	80	0.94	1.37
Territet,	375	105	0.28	0.37
Vernex,	550	125	0.23	0.53
Bassets,	950	145	0.15	0.40
Pointe de Peilz,	1025	175	0.17	0.83
Corsier,	775	220	0.28	0.50
Rivaz,	875	255	0.29	0.51
Treytorrents,	1650	270	0.17	0.40

	Largeur du talus.	Hauteur.	Pente moyenne.	Pente maxim.
Côte suisse.	*m.*	*m.*		
Lutry,	2725	305	0.11	
Ouchy,	3050	305	0.10	
Morges,	7875	305	0.04	
St-Prex,	6280	275	0.04	
Chanive,	3000	185	0.06	
Golfe de Rolle,	4250	125	0.03	
Côte de Savoie.				
Bouveret,	250	105	0.42	0.51
Fenalet,	200	165	0.82	1.16
1km W. de St-Gingolph,	700	205	0.29	
Locon,	450	225	0.50	
Meillerie,	550	270	0.49	
Tour-ronde,	1400	300	0.21	
Château de Blonay,	2200	305	0.15	
Evian,	2900	305	0.10	
Amphion,	3400	300	0.09	
Bouches de la Dranse,	3000	275	0.09	0.40
Thonon,	4800	235	0.05	
Coudrée,	6500	155	0.02	

J'ai indiqué la pente des talus en tant pour cent, 0.08 = 8 %, en tant pour mille, 0.008 = 8 ‰, suivant l'usage adopté généralement, à la suite des ingénieurs des ponts et chaussées. Pour ceux qui préfèrent se servir de degrés d'inclinaison, voici les principales pentes en degrés exprimées en tant pour mille :

15′	4 ‰	10°	177 ‰
30	9	15	268
45	13	20	364
1°	17	25	466
2	35	30	577
3	52	35	700
4	70	40	839
5	87	45	1000
6	105	50	1192
7	122	55	1428
8	140	60	1732
9	158		

Ces chiffres ne parlent pas à l'esprit des personnes qui sont peu habituées à évaluer la déclivité des pentes. Je viendrai à leur aide par la figure 10.



(Fig. 10.) Pente des talus.

Soient les lignes HH' et HV l'horizontale et la verticale ; la ligne HA représente une pente de 1.37, la pente maximale du talus du lac sous les murs de Chillon. La ligne HB une pente de 1.00, de cent pour cent, soit une pente un peu plus forte que le talus moyen de Chillon. La ligne HC une pente de 0.75 ou 75 %. La ligne HD une pente de 0.50 ou 50 %, la pente moyenne devant le Locon et Meillerie. La ligne HE une pente de 0.25, la pente moyenne du talus devant Territet, Vernex, Rivaz, Corsier, etc. La ligne HF une pente de 10 %, la pente moyenne devant Lutry, Ouchy, Evian. La ligne HG une pente de 5 %, la pente moyenne du talus de la partie occidentale du Grand-lac.

Quant à la nature même des talus, j'essaierai de l'interpréter comme suit :

La pente maximale d'un talus d'éboulement sous l'eau n'est jamais supérieure à 41°, soit 0.87, d'après les recherches de Thoulet,(1) même dans les conditions les plus favorables à la stabilité, calme absolu du milieu liquide, rugosité extrême des matériaux, etc. Tout talus de plus forte inclinaison implique nécessairement des parois rocheuses. Nous pouvons donc affirmer que devant Chillon (2) où la pente moyenne du talus est de 1.37, et devant le Fenalet près St-Gingolph où la pente est de 1.16, il y a des parois rocheuses. Je suis disposé à croire d'après les allures de la carte qu'il y a quelques assises rocheuses devant la pointe de Peilz, devant la Tour-de-Peilz, devant Rivaz et le Dézaley, et

(1) Etudes expérimentales sur l'inclinaison des talus de matières meubles. Nancy, 1887.

(2) Sous les murs de Chillon j'ai mesuré à 18^m du roc sur lequel est bâti le château, un fond de 37^m : à 23^m, 41^m de fond. Il y a là évidemment des parois rocheuses plus ou moins verticales.

peut-être aussi devant la terrasse rocheuse irrégulière qui s'étend de Clarens à la Tour-de-Peilz.

Tout le reste des talus du Haut-lac, quoique fort inclinés par places, me paraît formé d'éboulis meubles. La muraille formant sous-sol peut être rocheuse, mais elle est probablement, partout ou presque partout, recouverte d'éboulis de cailloux, galets, sables et alluvions lacustres.

Quant aux talus très peu inclinés de la partie occidentale du Grand-lac, avec des pentes qui n'atteignent pas 0.10, ils peuvent être des talus de glissement de terrains qui se sont effondrés en masse, étant donnée l'irrégularité de la pente, ou bien, ce qui est peut-être plus probable, les restes des anciens accidents irréguliers du sol avant l'invasion du bassin par les eaux du lac, ces accidents étant émoussés par l'alluvion lacustre.

Nous reviendrons plus loin sur les talus des deltas de rivières qui forment un accident de type général sur l'ensemble des talus du lac.

Le plafond. — Le plafond du Grand-lac se divise tout naturellement en trois parties qui sont, en allant de l'est à l'ouest, ou de l'origine du lac à sa sortie :

La rampe descendante partant des bouches du Rhône et aboutissant à la plaine des grands fonds.

La plaine centrale ou plaine de grande profondeur.

La rampe ascendante partant de la plaine centrale et aboutissant à la barre de Promenthoux.

Et d'abord la *plaine centrale* est un vaste trapézoïde que nous pouvons limiter par la courbe isobathe de 300^{m}. Elle occupe à peu près le milieu de la longueur du Grand-lac ; sa longueur est de 12^{km} depuis le profil Tour ronde-Villette au profil Amphion-Morges. Son bord méridional est parallèle à la rive savoyarde ; son bord septentrional est parallèle au bord savoyard dans toute la partie orientale jusqu'à Ouchy ; elle mesure dans cette région 6.5^{km} de large. A partir d'Ouchy son bord suisse descend obliquement et va rejoindre le bord méridional en faisant avec lui un angle de 30°. Son bord oriental est perpendiculaire à l'axe du lac et aux bords latéraux. Sa superficie est d'environ 60$^{km^2}$.

Cette plaine est admirablement plate. Ses bords continuent la pente des talus et des rampes orientales et occidentales sur une largeur d'un kilomètre au plus, et le centre tout entier est absolument hori-

zontal avec une profondeur de 307 à 309^{m}. Cette horizontalité est très remarquable. Je la compare à une table de billard, et ce n'est pas exagéré. Dans une expédition que fit M. Hörnlimann le 25 mai 1886 à la recherche du point de plus grande profondeur du lac, expédition à laquelle j'eus le plaisir d'assister, nous avons donné 10 coups de sonde sur un espace circulaire de 2.5^{km} de diamètre ; de ces sondages, 9 nous ont donné une profondeur variant entre 309.4 et 309.8^{m} ; un seul nous a donné 309.2^{m} ; en prenant 309.6^{m} comme moyenne, nous n'avons pas, sur une superficie de 5$^{km^2}$, des inégalités de sol dépassant 20 centimètres. Et encore, étant reconnue l'impossibilité où nous sommes de suivre de l'œil le fil de sonde et d'en vérifier la verticalité absolue, cet écart de 20^{cm} est-il presque dans les limites des erreurs d'observation.

Depuis lors cette plaine a encore été sondée à maintes reprises par les ingénieurs suisses et français dans le lever régulier de la carte ; leurs sondages ont confirmé ces données. Puis dans deux circonstances une étude spéciale de cette plaine centrale a été faite, avec un luxe exceptionnel de précautions, pour en assurer la profondeur avec la plus grande précision :

Le 1er et le 4 octobre 1888 les deux bateaux sondeurs de MM. Hörnlimann et Delebecque se sont donné rendez-vous et ont opéré conjointement, côte à côte. Six sondages ont donné les profondeurs suivantes :

309.6^{m}	1 coup	de sonde.
309.5^{m}	4	»
309.3^{m}	1	»

Le 22 mai 1889 M. Hörnlimann, après avoir vérifié à nouveau la graduation de son compteur et les corrections d'élasticité, a repris les sondages dans la plaine centrale ; il a trouvé :

309.5^{m}	5 coups de sonde.	
309.6^{m}	4	»
309.7^{m}	1	»

J'ai limité la plaine centrale à l'isohypse 70^{m} soit à la profondeur de 305.3^{m}, pour plus de commodité, car cette courbe est tracée dans la carte au 1 : 25 000e : Si je trace moi-même les courbes isohypses de un mètre d'écartement (1) je vois qu'elles sont encore assez serrées

(1) Je ne reproduis pas ici cette carte, car les différences minimes de profondeur qu'elle révèle sont, en partie, dans les limites des erreurs d'opération, et le relief

jusqu'à l'isohypse 67^m, mais qu'à partir de celle-ci le fond est à peu près horizontal. Je le prouverai en donnant la superficie du terrain limité par les isohypses.

Au-dessous de l'isohypse	70^m	prof.	305.3^m	60$^{km^2}$.
»	67	»	308.3	30
»	66	»	309.3	13

En admettant 309.7^m pour la profondeur maximale et en supposant que le lac se desséchât progressivement, il resterait au centre un lac de 60$^{km^2}$ (grandeur de l'Untersee ou lac de Constance inférieur) dont la profondeur ne dépasserait pas 4.4^m; quand le lac serait réduit à 30 $^{km^2}$ de superficie, la grandeur du lac de Brienz, il n'aurait plus que 1.4^m de profondeur; quand il serait réduit à 13$^{km^2}$ de superficie, soit encore le double du lac d'Egeri, sa profondeur maximale ne serait plus que de 40^{cm}.

Pour les sondages d'établissement de la carte au 1 : 25 000e il a été donné dans cette plaine centrale (sans compter les sondages de Gosset) :

Au-dessous de l'isohypse	75^m	isobathe	300.3^m	330	coups de sonde.
»	70	»	305.3	251	»

Parmi ces derniers il a été trouvé :

14	fois une profondeur de		309.4^m
22	»	»	309.5
19	»	»	309.6
3	»	»	309.7

Ainsi donc les sondages ont donné comme profondeur maximale 309.7^m. C'est celle que nous inscrivons comme le chiffre actuel et officiel. Mais je dois faire remarquer qu'étant donnée la difficulté, l'impossibilité de surveiller la verticalité absolue de la ligne de sonde dont l'opérateur ne voit que quelques mètres sous son bateau, il y a toujours une petite erreur en trop; ce chiffre doit être réduit de quelques centimètres. Nous ne savons comment apprécier cette erreur.

De cette étude attentive de la plaine centrale du Léman nous pouvons conclure :

1° Il n'y a pas un point de profondeur maximale, mais bien une plaine.

très peu accentué du sol qu'elle figure ne me semble pas suffisamment assuré. Mais j'ai le droit de me fonder sur elle pour affirmer l'égalité presque parfaite de la plaine centrale.

2° Cette plaine, parfaitement horizontale, est à la profondeur de 309.5m.

3° Les inégalités de cette plaine ne dépassent pas 2 décimètres en plus ou en moins.

4° La plus grande profondeur du lac est située entre Ouchy et Evian, à mi-lac.

5° La profondeur maximale actuelle, mesurée par les hydrographes en 1888, est 309.7m au-dessous du niveau moyen des eaux.

6° Le point le plus profond du lac est à l'altitude absolue [1] au-dessus de la mer 62.2m

375.3 — 309.7 — 3.4m = AA 62.2m.

Nous expliquerons la formation de cette plaine quand nous aurons appris à connaître le ravin sous-lacustre du Rhône et la descente de l'eau du fleuve dans les grands fonds du lac.

La *rampe descendante* ou rampe orientale du plafond du lac commence à la plaine du Rhône et aboutit à la plaine centrale des grandes profondeurs. Suivant le point de vue auquel on se place on peut la faire partir ou bien de Villeneuve où les courbes isobathes profondes avancent le plus loin dans le sens de la longueur du lac, ou bien des bouches du Rhône où le delta progressif du Rhône a son centre d'activité. C'est cette dernière manière de voir que j'adopterai pour ma description actuelle.

Si nous prenons comme origine de cette rampe descendante le bord de la région littorale, par 25m de profondeur, à 500m en avant de la rive devant l'embouchure du fleuve, nous voyons le profil en long du lac s'abaisser d'abord rapidement ; sur une longueur de 800m le fond s'affaisse de 75m, ce qui donne une déclivité assez grande, de 0.09. La pente s'adoucit ensuite progressivement : sur les 5km suivants elle n'est plus que de 0.025, sur les 8km suivants elle n'est plus que de 0.009 ; elle vient mourir en pente nulle à sa jonction avec la plaine de grande profondeur dont la limite est à 15km des bouches du Rhône. Il y a là une pente de déclivité décroissante d'une grande régularité, d'une grande beauté ; son inclinaison moyenne est de 0.020.

Un fait très apparent dans ce plafond du lac en rampe descendante,

[1] Je fais intervenir dans ce calcul la correction de — 3.4m du repère de la Pierre du Niton (voir p. 22).

c'est sa formation en cône aplati dont le sommet est aux bouches du Rhône. Les premières courbes isobathes, jusqu'à 100ᵐ de profondeur, présentent un sommet arrondi, saillant devant l'axe du fleuve, et s'avancent suivant des courbes fort proéminentes en arrière, à droite et à gauche, dans les golfes de Villeneuve et du Bouveret. L'embouchure du fleuve étant reportée très fortement à gauche, tout près du Bouveret, le golfe valaisan est beaucoup plus étroit et moins profond que le golfe vaudois à Villeneuve. Ce dernier est encore apparent jusqu'à 300ᵐ de profondeur devant Cully; le golfe du Bouveret cesse d'être marqué à 225ᵐ de fond, à moitié distance entre St-Gingolph et le Locon. Plus loin dans le lac, les courbes isobathes deviennent presque parfaitement perpendiculaires au grand axe du Léman; le plafond forme une plaine presque exactement horizontale dans ses profils transverses; la saillie du cône d'alluvion du Rhône, là où elle est le mieux marquée, devant Chexbres, ne s'élève pas à plus d'une dizaine de mètres au milieu de cette plaine. La plaine descendante du plafond du lac, si plane transversalement, est bordée de chaque côté par les talus latéraux très inclinés que nous avons décrits, talus qui viennent se couper à angle presque vif avec le plafond du lac. — La décroissance progressive de déclivité, la saillie de l'axe du fleuve sur le fond, la jonction à angles vifs avec les talus latéraux, tout dans ces allures indique avec évidence un comblement progressif, par les alluvions du fleuve, d'une vallée originairement beaucoup plus profonde.

Signalons dans ce vaste delta submergé du fleuve, qui forme le plafond en rampe descendante du lac, la présence du ravin sous-lacustre du Rhône que nous décrirons plus tard.

Le plafond de la rampe orientale est dirigé en descendant N. 75° W.

La rampe ascendante ou rampe occidentale du plafond du lac commence à la plaine centrale des grands fonds et aboutit à la barre de Promenthoux. Elle diffère absolument de la rampe orientale.

En premier lieu sa pente est plus faible : elle n'est que de 14.3 ⁰⁰/₀₀, tandis qu'en moyenne la pente de la rampe descendante est de 20 ⁰⁰/₀₀.

En second lieu sa pente est uniforme, presque partout la même, tandis que la pente de la rampe orientale, très forte au début, va progressivement en diminuant d'inclinaison.

En troisième lieu, tandis que la rampe descendante présente la

forme très évidente d'un cône d'alluvion immergé dont le sommet aboutit aux bouches du Rhône, cône d'autant mieux marqué que l'on se rapproche de ce centre d'action, le plafond de la rampe ascendante a de tout autres allures : A son origine dans les grands fonds de la plaine centrale, jusque devant les Dranses, le plafond est très étroit, sans largeur; les deux talus du lac viennent se réunir sous un angle à peine émoussé; c'est une vallée sans plaine au fond. Plus loin, à partir du profil les Fontanettes-les Dranses, le plafond s'élargit en se divisant en deux branches, (1) deux ravins séparés par une éminence mousse, de près d'une dizaine de mètres de hauteur; ces deux ravins sont reconnaissables jusqu'au profil Rolle-Anthy; le ravin savoyard est un peu plus profond que le ravin suisse. Le point le plus saillant de ce dos — il est trop large, 1^{km} environ, trop peu haut, au plus 10^{m}, et trop peu abrupt pour que j'ose l'appeler une arête — est sur la ligne embouchure de l'Aubonne-Anthy, à peu près à mi-lac. Plus à l'ouest l'éminence centrale disparaît, et le plafond du lac, fort élargi, représente un vaste cirque qui remonte vers la barre de Promenthoux.

Le cirque vient aboutir à la barre de Promenthoux et, à sa jonction avec elle, se creuse un ravin nettement dessiné, de telle sorte que le col de la barre est fort bien marqué du côté du lac.

Le talus septentrional de la rampe ascendante a sa ligne de plus grande pente dirigée S. 35° E., devant St-Prex; en approchant de la barre de Promenthoux elle se détourne en se relevant vers l'est.

Le talus méridional a sa ligne de plus grande pente à peu près directement vers le nord devant Amphion et les Dranses; en approchant de la barre de Promenthoux la pente de ce talus se dévie de même vers l'est. Il en résulte que, à partir de Rolle, la rampe ascendante avec les talus tend à prendre la forme d'un cirque regardant vers l'orient.

Le plafond de la rampe occidentale a son axe ascendant dirigé S. 75° W.

L'axe de la vallée, que nous ferons passer par le ravin méridional qui longe le dos d'âne médian, est sensiblement reporté du côté de la Savoie. Tandis qu'il passe à 6^{km} de la côte suisse devant Buchillon, il n'est qu'à 3^{km} de la pointe de la Dranse. Si nous faisons abstraction de la saillie accidentelle de ce promontoire d'alluvion récente, l'axe

(1) Ce détail n'est apparent que sur la carte à courbes équidistantes de 10^{m}.

du plafond peut être dit passer à 5^{km} de la ligne générale des côtes savoyardes.

J'illustrerai encore la différence très importante qui sépare les régions du Grand-lac dans la forme de leurs profils en travers. Dans les régions orientale et centrale les talus très inclinés viennent se souder à angle vif sur une plaine centrale horizontale. C'est ce que montre la fig. 11 qui donne le profil Cully-Meillerie, au 1 : $200\,000^{e}$ l'échelle des dimensions verticales étant 8 fois plus forte.



(Fig. 11.) Profil Cully-Meillerie.
Echelle horizontale 1 : $200\,000^{e}$, verticale 1 : $25\,000^{e}$.

Dans la partie occidentale les talus sont peu inclinés et viennent aboutir presque sans transition à un thalweg sans largeur. C'est ce que montre la fig. 12 qui donne le profil St Prex-Amphion à la même échelle que la fig. 11.



(Fig. 12.) Profil St Prex-Amphion.
Echelle horizontale 1 : $200\,000^{e}$, verticale 1 : $25\,000^{e}$.

Pour terminer je donnerai la profondeur du Grand-lac dans ses diverses parties.

Au large de Chillon	90 m
— Veytaux	100
— Montreux	125
— Clarens	145
Profil Vevey-St Gingolph	225
St Saphorin-Locon	250
Cully-Meillerie	275
Villette-Tour ronde	300
Ouchy-Evian	309.5
Morges-Amphion	300
St Prex-Pointe de la Dranse	260
Chanivaz-Thonon	210
Rolle-Anthy	150
Dully-Coudrée	80
Barre de Promenthoux	66.4

2° *Le Petit-lac.*

Tandis que le Grand-lac est un seul bassin, unique, uniforme, de grande dimension, large et profond, le Petit-lac est constitué par une vallée peu profonde, peu large, décomposable dans sa longueur en une série de cuvettes ou fosses. Celles-ci sont, il est vrai, peu marquées, et les barres qui les séparent sont peu saillantes; mais elles n'en sont pas moins évidentes et, de leur fait, le bassin du Petit-lac a un caractère très différent de celui du bassin principal du Léman.

Malgré cette séparation en fosses successives, le Petit-lac forme dans sa longueur une vallée unique; le plafond de chacune des cuvettes fait suite à la cuvette précédente.

Les talus du Petit-lac sont généralement peu inclinés; nous n'y trouvons nulle part de pente indiquant une paroi rocheuse, comme nous en avons vu quelques-unes dans le Haut-lac. Cependant en certaines localités, devant Hermance, devant Chevran, nous avons des pentes de 40 pour cent, ce qui est déjà un talus d'assez belle déclivité : en général l'inclinaison des talus est inférieure à 10 pour cent.

Partout les talus viennent se terminer en pente douce, graduellement décroissante à leur jonction avec le plafond. Nous en concluons que nulle part l'action de comblement de la vallée ne dépasse en activité l'action de formation des talus par voie d'éboulis.

Le plafond du Petit-lac diffère dans ses allures de celui du Grand-lac. Tandis que dans ses profils transverses ce dernier représente, comme nous l'avons vu, ou bien une vallée aplatie, coupée à angles vifs par des talus latéraux, ou bien une vallée étroite, ligne de jonction des plans inclinés des deux talus latéraux, dans le Petit-lac le plafond est une vallée large, plus profonde au milieu que sur les bords, et se relevant vers les talus en pente progressivement croissante. J'en donnerai un exemple dans la fig. 12 en représentant le profil Coppet-Chevran, à l'échelle du 1 : 62 500e, les dimensions verticales étant exagérées 12.5 fois.



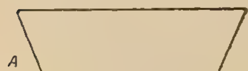
(Fig. 12.) Profil Coppet-Chevran.
Echelle horizontale, 1 : 62 500e.
Echelle verticale, 1 : 5000e.

Je caractériserai les trois types de profils que nous avons dans le Léman par les termes suivants, en les accompagnant d'une figure schématique qui précisera mon idée :

Dans le Haut-lac le profil est trapézoïde (fig. 13 A).

Dans la rampe occidentale du Grand-lac il est triangulaire (fig. 13 B).

Dans le Petit-lac il est semi-ovalaire (fig. 13 C).



A. Haut-lac.



B. Grand-lac, partie occident.



C. Petit-lac.
(Fig. 13.)
Schéma des profils du Léman.

Si nous suivons le plafond du Petit-lac en descendant du côté de Genève nous trouvons la série de bassins secondaires suivants, que je caractériserai par les cuvettes ou fosses et par les barres qui les séparent.

Et d'abord la barre de Promenthoux (fig. 14). A la jonction du Grand et du Petit-lac, dans le détroit de 3.5^{km} qui sert de limite aux deux parties du lac, le bassin du Léman montre, en prolongation de la rampe ascendante du plafond du Grand-lac, un col sous-lacustre large, profond de 66.4^{m} à sa partie la plus déprimée. (1) Ses contours sont mousses et arrondis, aussi bien dans le profil longitudinal dont les pentes sont très douces et très allongées, que dans le profil transverse relativement étroit et resserré. Nulle part nous n'y trouvons une arête saillante ou aiguë. Le sommet du col est à mi-lac, sur la ligne qui joint la pointe de Promenthoux à celle de Nernier.

Quand nous étudierons le sol du lac nous constaterons la présence, près de cette barre de Promenthoux, d'une moraine glaciaire submergée, la moraine d'Yvoire, et nous aurons alors à discuter l'origine de la barre.

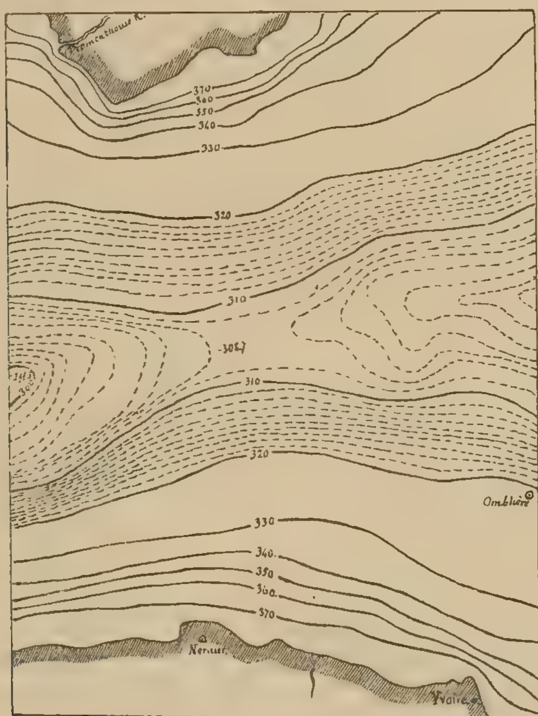
Ce qui justifie l'appellation de barre que je lui ai attribuée, c'est qu'elle fait saillie sur le fond du lac.

Au-delà de la barre, devant Nyon, nous trouvons une première cuvette de 76.5^{m} de profondeur, soit de 10.1^{m} plus profonde que le col de la barre de Promenthoux. La fosse de Nyon est limitée au

(1) Je suis toujours étonné du défaut de précision des géographes quand ils indiquent la profondeur d'une passe ou d'un seuil sous-marin. Je trouve des données dans ce genre : « La crête de la passe d'entrée de la Méditerranée entre le cap Trafalgar et le cap Spartel varie de 100 à 550^{m}; elle est en moyenne de 275^{m} seulement. » Une telle indication est absolument insuffisante. La profondeur d'une passe est un chiffre aussi précis que l'altitude d'un sommet de montagne, c'est une valeur analogue à celle de l'altitude d'un col entre deux vallées. La profondeur d'une passe est la cote bathymétrique du point le plus bas du profil transverse de la passe, qui est en même temps le plus élevé du profil en long.

S.-W. par une seconde barre, peu saillante aussi, entre Colovray et la pointe de Messery, avec une profondeur de 63.2^{m}.

Une deuxième cuvette, la fosse de Tougues, a son fond devant Tougues avec une profondeur de 70.4^{m}.



(Fig. 14.) Barre de Promenthoux. 1 : 50 000e. (1)

La barre qui la limite du côté de Genève est devant Hermance avec un fond de 64.5^{m} ; elle limite la troisième fosse devant le village de Chevrau, dont le fond est par 70.7^{m} soit à 3^{dm} près à la même profondeur que la cuvette de Tougues. Le fond de la fosse de Chevran est à 1500^{m} seulement de la rive gauche, à 3^{km} de la rive suisse.

Un peu au nord de cette dépression, à mi-lac devant Coppet, la carte au 1 : 25 000e dessine par une courbe isohypse fermée une petite

(1) Sur cette carte partielle j'ai tracé les courbes isohypses avec un mètre d'équidistance sur toute la partie centrale du col du détroit ; sur les bords elles eussent été trop serrées et je leur ai donné une équidistance de 10^{m}.

cuvette accessoire, fosse de Coppet; elle ne s'enfonce que fort peu, de 1.5^m seulement, au-dessous de la plaine générale, à 66.3^m de profondeur.

De la barre de Promenthoux au profil de Versoix, la profondeur du Petit-lac, indépendamment de ces barres peu saillantes est donc d'une profondeur assez uniforme variant de 63.2^m à 76.5^m ; les plus grandes inégalités ne dépassent pas 13.3^m.

Dans toute cette partie le plafond du lac a sa ligne de plus grande profondeur, l'axe du lac, rejetée du côté de la Savoie, à $^2/_3$ environ de la largeur du lac.

Mais à partir du profil Versoix-Anières le lac perd rapidement de la profondeur ; un accident intéressant que nous aurons à décrire sous le nom d'îlot submergé des Hauts-monts, devant la Gabiule, rétrécit notablement le plafond du lac, et une barre beaucoup plus haute que la précédente ramène le plafond entre Genthod et Bellerive à 47.0^m.

Au delà de cette barre est une dernière fosse peu profonde, 50.4^m, au large de Bellevue.

De là le fond se relève graduellement jusqu'au Banc du Travers qui termine le lac sous 3^m d'eau.

Je résumerai comme suit la profondeur du Petit-lac dans ses points principaux :

Col de la barre de Promenthoux,	66.4^m
Fond de la fosse de Nyon,	76.5
Col de la barre de Messery,	63.2
Fond de la fosse de Tougues,	70.4
Col de la barre d'Hermance,	64.5
Fond de la fosse de Chevran,	70.7
Fosse accessoire de Coppet,	66.3
Col de la barre de Genthod,	47.0
Fond de la fosse de Bellevue,	50.4
Col du Banc du Travers,	3.0

Pour donner une idée du relief du Petit-lac, je supposerai que le niveau de l'eau du Léman soit abaissé de 67^m par un émissaire souterrain du Grand-lac, arrivant ainsi à la cote d'altitude absolue de 308.3^m. Le lac ainsi vidé laisserait trois étangs étagés entre la barre de Promenthoux et Genève, à savoir :

1° L'étang de Nyon avec une longueur de		3.5^{km}
une profondeur maximale d'eau de	10.1^{m}	
une altitude au-dessus du nouveau niveau du lac	0.6^{m}	
2° L'étang de Tougues-Chevran-Coppet, longueur,		8.0^{km}
altitude sur le nouveau lac,	3.2^{m}	
profondeur dans la fosse de Tougues,	7.2^{m}	
— de Coppet,	3.1^{m}	
— de Chevran,	7.5^{m}	
3° L'étang de Bellevue, longueur,		2.0^{km}
altitude relative,	20,0^{m}	
profondeur maximale,	3.4^{m}	

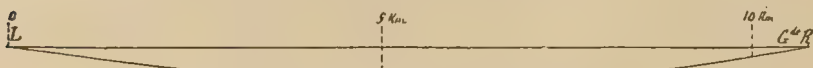
En terminant cette description générale du relief en creux de la région profonde du lac Léman, je voudrais essayer de donner une juste impression des dimensions relatives du lac. Nous sommes toujours disposés à exagérer les hauteurs verticales par rapport aux longueurs horizontales, à les estimer trop fortes; les hauteurs et les profondeurs paraissent à leur avantage et l'on apprécie le plus souvent le creux d'une vallée, la hauteur d'une montagne comme plus grands qu'ils ne le sont en réalité. Voyez par exemple les anciens reliefs des pays montagneux, où les hauteurs verticales étaient en général exagérées de deux ou trois fois leur valeur; les auteurs croyaient avoir représenté exactement la contrée, ou tout au moins en avoir donné une impression fidèle. Si le bassin que l'on étudie est rempli d'eau, et si l'œil cherche à évaluer la déclivité du talus, nous sommes en outre portés à en exagérer la pente par le fait de l'opalinité du liquide; cette opalinité, ou défaut de limpidité, fait fuir à la vue les profondeurs, et la hauteur verticale en est faussement amplifiée.

Il nous semble à tous que notre lac est un vase très profond. En réalité il est un bassin d'eau de bien peu d'épaisseur. Sa profondeur de 309^{m} n'est que le $^{1}/_{237}{}^{e}$ de sa longueur, 73.2^{km}, ou le $^{1}/_{45}{}^{e}$ de sa largeur de 13.8^{km}. Si l'on faisait à l'échelle de la carte fédérale au 1 : 100 000e un modèle exact du lac, sa profondeur ne serait que de 3^{mm}. Ce serait l'épaisseur d'une lame d'eau répandue librement sur une table de marbre.

Si je voulais représenter par un dessin à l'échelle réelle le profil en

long du lac, étant donnée la largeur de 10cm dont je puis disposer dans ce livre, la profondeur ne serait figurée que par une ligne de 0.4mm, l'épaisseur d'un trait de plume. Je renonce à essayer de donner ici ce profil en long.

Le profil en travers est plus facile à figurer, vu la moins grande longueur de la dimension horizontale ; la fig. 15 représente, aussi exactement que je puis le faire dans des dimensions aussi minimes, le profil en travers Lutry-Tour ronde, au 1 : 100 000e. (1)



(Fig. 15.) Profil Lutry-Tour ronde. 1 : 100 000e. (2)

Accidents locaux. Après cette esquisse générale du bassin du lac, j'ai à signaler quelques accidents locaux, apparents sur la carte hydrographique. Je me bornerai ici à en faire la description géographique, réservant les conclusions définitives sur la nature et l'origine de la plupart d'entre eux aux chapitres où je traiterai de la nature du sol et de l'origine géologique du lac Léman.

1° Les *cônes d'alluvion* des différents fleuves, rivières et torrents qui se jettent dans le lac. Chaque affluent apporte son alluvion dans le lac : les parties grossières, les galets et les sables se déposent dans la région littorale, devant l'embouchure et sur ses côtés et tendent à faire progresser le delta émergé ; à mesure que celui-ci avance, la

(1) Je préfère autant que possible figurer les profils à leur échelle naturelle, sans exagérer les hauteurs verticales. Au premier abord de tels profils donnent des effets surprenants, je dirai même choquants : nous avons tellement l'habitude d'apprécier les hauteurs verticales en les exagérant mentalement que, lorsque nous les voyons représentées à l'échelle réelle, elles nous semblent diminuées, déprimées. Mais une fois qu'on a pris la peine de corriger cette mauvaise habitude en figurant les verticales à leur échelle réelle, à la même échelle que les horizontales, on arrive certainement à une meilleure et plus juste appréciation des valeurs relatives et du relief vrai. C'est ce que l'on a pu constater sur les modèles en relief des montagnes. Depuis que, suivant les leçons du professeur A. Heim, de Zurich, les topographes suisses figurent dans leurs reliefs les hauteurs à la même échelle que les longueurs, les Imfeld, les Simon ont obtenu les effets remarquables de représentation réelle de la nature que nous avons admirés dans les dernières années. — Quand je n'indiquerai pas spécialement que dans mes profils les hauteurs ont été exagérées (comme cela a eu lieu pour mes fig. 10 et 11) il sera donc entendu que l'échelle des hauteurs est la même que l'échelle des longueurs.

(2) C'est par erreur que sur le cliché du côté savoyard l'on a inscrit les lettres GdeR ; il devait y avoir T. R. (Tour-ronde.)

pente du talus augmente et finit par dépasser les limites de l'état d'équilibre d'une masse meuble sous l'eau; les assises supérieures s'éboulent alors et s'étalent sur la pente du talus, ce qui fait progresser le cône dans les profondeurs du lac. Une autre partie, l'alluvion impalpable, est plus ou moins longtemps en suspension dans l'eau et est transportée plus ou moins loin avant de se déposer au fond du lac. Il en résulte que devant le cône d'éboulement d'alluvion grossière du torrent, il se forme un cône d'alluvion impalpable qui le continue en une pente douce : celle-ci va en mourant se confondre avec le plafond du lac. Plus l'alluvion est grossière, plus le cône immergé a ses talus inclinés.

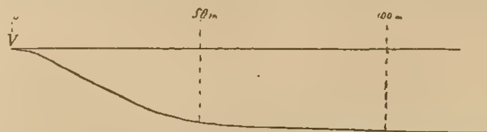
De ces cônes d'alluvion fluviale, le plus important et le plus considérable est celui du Rhône; dans la partie émergée le delta du fleuve a formé la plaine du Rhône et continue à progresser en raccourcissant le lac dans sa longueur; dans le lac il forme un talus d'éboulis qui descend en pente rapide devant l'embouchure du fleuve, puis il se continue au loin par les dépôts de son alluvion impalpable tout le long de la rampe descendante du plafond, et jusque dans la plaine centrale. Je développerai ce point plus loin, et je prouverai que l'étendue de ce cône d'alluvion peut se suivre jusqu'à 25^{km} de distance dans le lac, que tout le plafond du Haut-lac, y compris la plaine centrale, est formé par ce cône. Je n'ai pas à revenir ici sur la pente générale de ce cône d'alluvion et sur les modifications locales qu'elle présente; je les ai suffisamment décrites quand j'ai parlé du plafond du lac, page 53; je les représente ici (fig. 16), par une coupe du delta immergé, jusqu'à 4^{km} du rivage.



(Fig. 16.) Cône d'alluvion sous-lacustre du Rhône. 1 : 50 000e.

Les cônes d'alluvion des autres rivières sont apparents sur la carte géographique par le delta émergé qui fait saillie sur les rives, sur la carte hydrographique par leur cône d'éboulis qui fait saillie sur les talus du lac. Les lignes isobathes s'incurvent devant ces cônes en formant une concavité extérieure qui interrompt leur courbe générale convexe de lignes enveloppantes. Le talus d'éboulement de ces cônes a une pente qui s'élève à 0.40 et même à 0.47 soit 25° d'inclinaison, ce dernier chiffre étant mesuré sur le cône de la Veveyse, devant l'embouchure du torrent.

Je répète ici ce que j'ai dit de la faible inclinaison absolue des pentes de ces talus d'éboulement; ils paraissent à l'œil posséder une très forte déclivité, en réalité la pente est très modérée; la figure 17



(Fig. 17.) Cône d'alluvion sous-lacustre de la Veveyse. 1 : 2000e.

représente à l'échelle réelle la pente du cône d'alluvion immergé de la Veveyse, l'un des plus inclinés du lac.

Le plus important de ces cônes fluvio-lacustres latéraux du lac est celui de la Dranse, qui fait une saillie de 2^{km} environ sur la ligne générale des côtes entre Thonon et Amphion; son delta émergé a une superficie de plus de 10^{km^2}; l'incurvation des courbes isobathes se fait sentir jusqu'à 200^m de profondeur.

Viennent ensuite les deltas de la Veveyse, de la baye de Montreux, de la Venoge, de l'Aubonne, de la Promenthouse, de la Versoie, etc. Chaque torrent, chaque ruisseau, en apportant son alluvion au lac, forme son delta grand ou petit, qu'avec un peu d'attention on reconnaît sur la carte géographique et hydrographique du lac.

Notons cependant que le delta de la Venoge, qui sur la carte géographique du lac paraît énorme, est en grande partie constitué par un éperon de roches anciennes. Les couches de la molasse aquitanienne sont apparentes dans les falaises qui bordent au sud le village de St-Sulpice, entre l'ancienne abbaye et la pointe de la Venoge, d'une part, au-dessous du village de Préverenges d'une autre part; les boues glaciaires se retrouvent sur la côte de Préverenges presque jusqu'à la pointe de la Venoge. L'alluvion fluviale moderne entre pour très peu de chose dans l'établissement de ce promontoire saillant.

On constatera avec intérêt sur les cartes hydrographiques à grande échelle, et même sur celle au 1 : 100 000e, les allures très différentes des cônes immergés du Rhône d'une part avec sa pente très douce, de 1 % seulement dans le premier kilomètre, se prolongeant très loin sous les eaux du lac jusque dans la plaine centrale, et des autres affluents d'autre part, la Dranse, la Veveyse, la baye de Montreux, la Morge de St-Gingolph, etc., avec leur talus très incliné. Cette différence tient essentiellement à la nature de l'alluvion, relativement très fine

dans le Rhône, qui est entraînée par le courant très avant dans le lac, très grossière dans les affluents torrentiels, qui est déposée immédiatement à l'embouchure. Les figures 16 et 17 font voir aussi fort bien cette différence de type.

2° Le *ravin sous-lacustre du Rhône*. La carte hydrographique du lac de Constance levée en 1883 dans les eaux suisses, en 1889 dans les eaux allemandes, par M. l'ingénieur J. Hörnlimann, du bureau topographique fédéral, a révélé un fait tout nouveau et très intéressant de géographie physique. Le Rhin (1) à son entrée dans le lac continue son cours dans un vaste ravin sous-lacustre, creusé dans le cône submergé, ravin qui a été suivi fort loin de l'embouchure, jusqu'à 11^{km} de distance, en suivant les contours du ravin (la longueur rectiligne n'est que 9^{km}), ravin qui descend jusqu'à de grandes profondeurs dans le lac, devant Langenargen, jusqu'à 205^{m} sous la nappe des eaux. Dans son profil de plus grand développement, il mesure 600^{m} de largeur et 70^{m} de profondeur au-dessous de ses berges ; à mesure qu'il s'avance vers la plaine centrale sa profondeur se réduit à 10^{m}, puis il finit par mourir.

En 1885, M. Hörnlimann, en levant la carte hydrographique du Haut-lac Léman, s'est appliqué à retrouver des faits analogues ; il a multiplié ses sondages et ses profils, et la feuille 466 de l'atlas Siegfried (fig. 18) montre d'une manière brillante la répétition de la même structure découverte auparavant dans le lac de Constance.

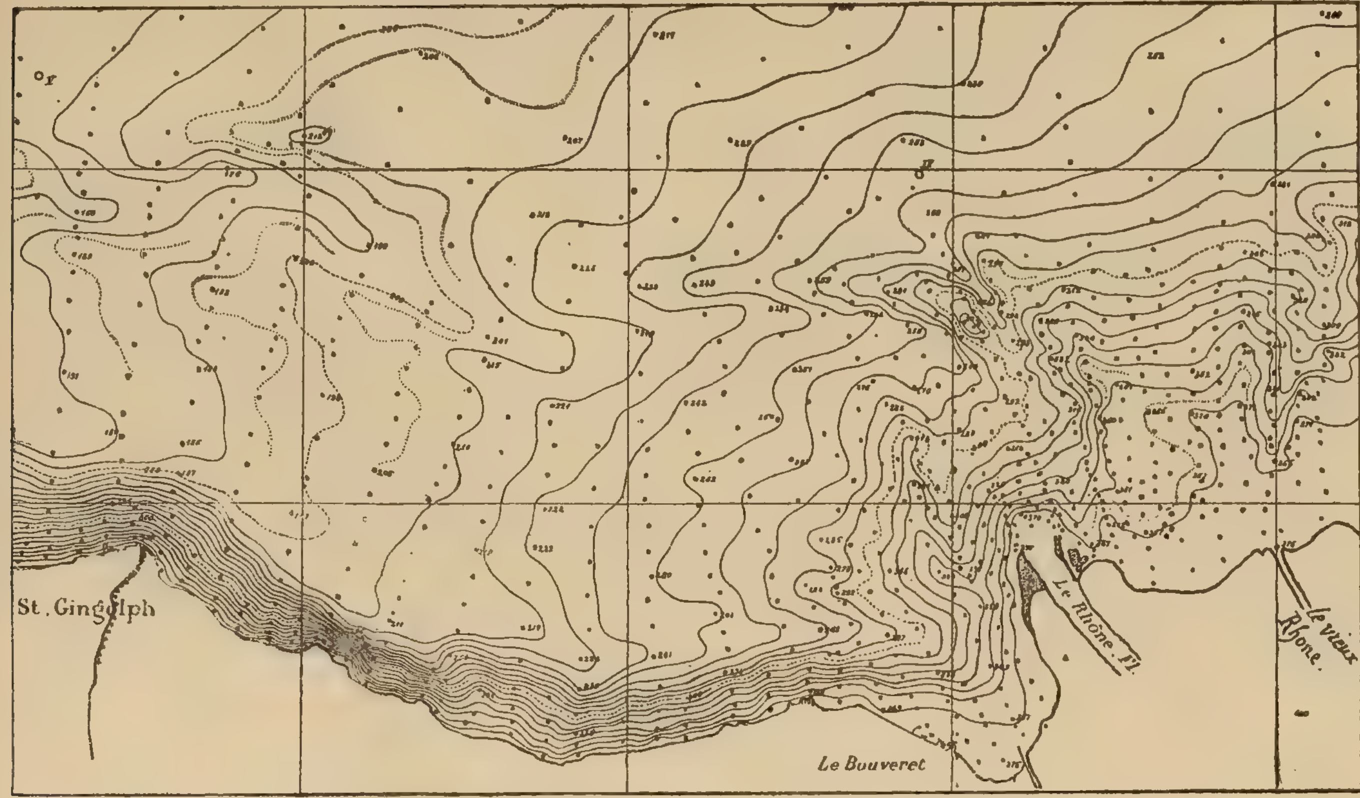
Le ravin sous-lacustre du Rhône (2) a été suivi dans le Léman jusqu'à 9.5^{km} de distance rectiligne de l'embouchure du fleuve, à 10.25^{km} en suivant les méandres du lit ; sa largeur varie de 500 à 800^{m}. La profondeur de la tranchée, qui atteint 50^{m} à 0.8^{km} de la bouche du Rhône, est encore de 10^{m} au-delà de St-Gingolph par 230^{m} de fond ; elle est encore visible sur l'isobathe de 255^{m}, mais disparaît au-delà. (3)

Le ravin est constitué par un sillon creusé dans le cône d'alluvion

(1) Atlas Siegfried, feuilles 71 et 81. — Levers par M. J. Hörnlimann de la carte hydrographique du lac de Constance, établie par le consortium des cinq Etats riverains.

(2) *F.-A. Forel.* Le ravin sous-lacustre du Rhône. *Bull. S. V. S. N.*, XXIII, 85. Lausanne, 1887.

(3) Pour étudier le ravin dans ses détails consultez les cartes à grande échelle ; mais ses allures générales sont déjà parfaitement évidentes dans ma carte au 1 : 100 000e grâce aux courbes intermédiaires que j'y ai intercalées en ce point.



(Fig 18.) Le ravin sous-lacustre du Rhône. 1 : 35 000e. Equidistance des isohypses 10^m. (1)

(1) Cette figure est la reproduction, en réduction par la zincogravure, d'une partie de la carte originale de M. J. Hörnlimann. Les isohypses ont une équidistance de 10^m. J'y ai indiqué les coups de sonde par un point noir, selon les propositions formulées à la page 38.

immergé, ou plutôt par deux digues latérales faisant saillie de chaque côté d'une tranchée. Le talus interne de ces digues, celui qui regarde le ravin, est beaucoup plus incliné que le talus externe qui rejoint en pente douce la surface générale du cône d'alluvion; entre les digues, le fond du ravin est à peu près au niveau de cette surface, tandis que dans le cas du Rhin il est sensiblement plus profond.

Le ravin n'est pas rectiligne, il est plusieurs fois contourné en courbes adoucies, alternant de direction, véritables méandres d'un lit de fleuve. Il est à peu près parallèle à la ligne du rivage sud du lac, qu'il suit presque exactement à deux kilomètres en avant de la côte, du Bouveret à St-Gingolph. Au-delà de St-Gingolph, devant le Locon, il s'éloigne de la rive savoyarde et s'infléchit dans la direction de Lausanne.

Sur les digues latérales du ravin, l'on voit en plusieurs points de petites éminences qui s'élèvent notablement au-dessus du relief général des digues. La plus considérable est sur la digue de droite, à 1250^{m} de la bouche du Rhône, par 75^{m} de fond ; son sommet est de 20^{m} plus élevé que la crête de la digue qui le précède; la base du cône a environ 200^{m} de largeur. La drague de M. Hörnlimann a rapporté un échantillon du sol en ce point et l'a trouvé être du sable lavé, sans mélange de vase. Le cône est situé à la partie convexe de l'un des contours du ravin, et l'on peut admettre que cette localité est le siège de remous puissants du fleuve sous-lacustre qui circule dans la tranchée. Un petit ravin qui le contourne du côté du N.-E. est peut-être l'indice d'une division du courant sous-lacustre. Les autres points saillants sont moins prononcés; l'un d'eux cependant, au large de St-Gingolph, par 162^{m} de fond sur la rive droite du ravin, représente encore un pointement de 5 à 6^{m} sur le sol environnant.

Un ravin analogue, mais beaucoup plus petit, est visible devant l'embouchure du canal qui porte le nom de Vieux-Rhône, et qui est probablement une ancienne bouche du fleuve. Il semble qu'on pourrait deviner les indices de deux autres ravins, très effacés et difficiles à reconnaître, creusés dans le talus du lac, entre le Vieux-Rhône et Villeneuve.

Quand nous aurons cité un ravin secondaire constaté par M. Hörnlimann devant le village d'Altenrhein, au lac de Constance, dans une situation analogue à celui du Vieux-Rhône, nous aurons tous les faits connus jusqu'à présent de ravins sous-lacustres des fleuves glaciaires.

Il n'a rien été retrouvé de semblable à l'embouchure de la Reuss dans le lac des Quatre-Cantons. M. Hörnlimann, qui avait découvert le phénomène l'année précédente dans le lac de Constance, l'a recherché attentivement dans les sondages qu'il fit en 1884 pour l'établissement de la carte hydrographique du lac des Quatre-Cantons ; il n'en a pas constaté trace. (1)

Je chercherai plus loin à établir la nature et le mode de formation de ces ravins sous-lacustres ; mais je ne pourrai, d'une manière utile, en donner la théorie que lorsque j'aurai étudié les eaux du Rhône, et je la renvoie à un chapitre ultérieur.

3° Dans les talus du Haut-lac j'ai à signaler sur la côte suisse :

a Entre Clarens et la pointe de Peilz, une structure assez compliquée. La région littorale forme une terrasse rocheuse qui s'avance fort loin, jusqu'à 500^m au large de la Maladaire ; elle est très inégale, irrégulière ; elle serait trop longue à décrire et je renvoie à la feuille 464 de l'atlas Siegfried. Les talus de cette terrasse sont irréguliers et présentent entre autres deux points saillants, l'un devant la Maladaire, visible surtout dans les profondeurs de 100 à 120^m, l'autre au large de la pointe de Peilz, apparent jusqu'au pied du talus, à 175^m de fond. J'attribue cette complication de structure et ces irrégularités à des saillies rocheuses des murailles du lac ; elles ne sont pas encore égalisées par les éboulis des talus littoraux.

b De la pointe de Peilz au fond du golfe de Vevey-la Tour, le talus est tellement incliné jusqu'à la profondeur de 100^m que je crois en ce point à l'existence d'une muraille rocheuse ; cette muraille se continue devant la pointe de Peilz en une saillie ou éperon visible sur les courbes de 150 à 175^m de fond.

c Entre le Creux de Plan et Rivaz, la côte, très déclive, a des variations locales de pente qui sont probablement l'indice de terrasses rocheuses.

d Au large du Désaley, le pied du talus, dans les profondeurs de 250 à 275^m, montre un éperon très apparent qui se prolonge jusqu'à 2^{km} de la rive ; il n'est pas fort élevé, sa saillie n'étant guère que de 10^m ; mais il amène de grandes incurvations des courbes isohypses et

(1) Je ne parle pas de l'embouchure de l'Aar dans le lac de Brienz. Quand en 1866 MM. W. Jacky et Lindt ont levé la carte hydrographique de ce lac, le fait de ces ravins sous-lacustres n'était pas encore connu, et il peut avoir échappé à l'attention d'observateurs non prévenus.

il est fort évident sur la carte au 1 : 25 000e. Est-ce un glissement de terrain, est-ce une saillie du sous-sol? Nous l'ignorons.

e Au large de Villette, à 2^{km} de la rive, dans les fonds de 250^{m}, sur la rampe du talus, il y a un accident plus caractérisé encore. Un éperon saillant, analogue à celui du Désaley, est surmonté par un pointement qui se relève de près de 11^{m} au-dessus de l'arête qui le rattache au talus général. Si le lac abaissait son niveau de 250^{m}, il y aurait là une petite île émergeant de 10.9^{m} au-dessus des eaux.

f Devant Lutry, à 500^{m} en avant, devant Pully, à deux places près du rivage, il y a de petits accidents indiquant probablement des parois rocheuses plus ou moins saillantes sous l'alluvion du lac.

Si je résume l'impression que me donne l'étude de la carte du lac pour le talus de Villeneuve à Ouchy, il me paraît que ce talus, fort incliné, fort accidenté, doit être considéré comme une paroi rocheuse à terrasses locales irrégulières, tantôt partiellement recouverte par les éboulis des galets de la rive qui y forment un talus à déclivité régulière, tantôt à nu sous une couche, peut-être très faible, d'alluvions lacustres. Les cônes d'alluvion des torrents font saillie sur cette côte par des talus réguliers qui descendent jusqu'au plafond du lac.

Si l'on veut avoir l'image de cette côte immergée, que l'on considère la côte émergée qui la domine; les flancs de Lavaux donneront une excellente idée de ce qui doit exister sous l'eau. Le sol sous-lacustre doit être la continuation de la terre ferme avec quelques différences, entre autres :

a Les talus d'éboulement sous l'eau sont tantôt plus, tantôt moins inclinés que ceux à l'air libre. Cela varie selon les localités.

b Le sol à l'air est plus accidenté que le sol immergé. Le premier est soumis à l'érosion de l'eau courante qui en accentue les irrégularités; le second est soumis à l'alluvion de l'eau stagnante qui en comble les dépressions.

4° Dans le fond du golfe de Morges, entre Morges et la pointe de la Venoge, je vois un ravin assez bien dessiné qui entre dans les terres jusqu'à la profondeur de 75^{m}. Il est limité à l'ouest par un saillant qui semble au premier abord être le cône d'alluvion de la rivière la Morge; mais cet affluent est trop faible et d'une trop petite puissance de transport pour expliquer un cône immergé aussi accentué, et qui s'avance aussi loin de l'embouchure (jusqu'à près de 3^{km} de la rive). Il est bordé à l'est par la côte de Préverenges et la pointe de la Venoge ; sur cette

côte les couches mollassiques, les argiles glaciaires et l'énorme moraine de gros blocs visibles dans le littoral montrent que nous avons affaire à un ancien sol des murailles du lac et non à un delta d'alluvion récente comme on pourrait le supposer à première vue, en ne consultant que les cartes géographiques et hydrographiques. Je suis disposé à considérer la fosse du golfe de Morges comme étant peut-être un reste encore apparent de l'ancienne vallée de la Venoge qui passait probablement avant l'établissement du lac actuel, entre Echandens et Préverenges, à un niveau relatif très inférieur.

5° Dans le talus du Haut-lac sur la côte savoyarde je n'ai aucun accident à signaler. Sauf la paroi rocheuse de Fénalet près de St-Gingolph, ce ne sont partout que des talus d'éboulement très régulièrement inclinés.

6° Dans le talus de la partie occidentale du Grand-lac, aussi bien sur le versant suisse que sur le versant savoyard, il y a un assez grand nombre de petites inégalités peu saillantes qui sont apparentes par les sinuosités des courbes isobathes; elles ont peu d'importance et aucune d'elles ne mérite une description spéciale (voir les feuilles 436, 436 *bis* et *ter*, 437, 437 *bis* et *ter* de l'atlas Siegfried). Il me paraît probable que ces irrégularités des talus sont des restes des inégalités du sol émergé, avant la formation du lac; les talus formaient les flancs d'une vallée ouverte à l'air libre; ces flancs de vallée étaient ravinés par les érosions partielles; l'alluvion lacustre n'a pas encore comblé ces sculptures des murailles primitives du lac.

Les deltas de rivières de cette partie du Léman, formant leur cône d'éboulement sur un talus général très peu incliné, n'avancent que peu dans le lac, et l'incurvation des courbes isohypses ne se prolonge pas comme dans le Haut-lac jusqu'au plafond du thalweg.

Sur les flancs du cône immergé de la Dranse, il y a deux petits ravins bien marqués, l'un à droite, l'autre à gauche de la bouche actuelle de la Dranse. Faut-il y voir des ravins sous-lacustres analogues à celui du Rhône, et de même nature que lui? Je n'ose pas me prononcer. Mais je ferai remarquer que la Dranse, n'étant pas alimentée par des glaciers et des neiges éternelles, est loin d'avoir en été une température aussi basse que le Rhône et que son eau, par conséquent moins dense, doit moins régulièrement descendre dans les grands fonds. (1)

(1) Voir plus loin la théorie de la formation des ravins sous-lacustres du Rhône.

7° Dans le Petit-lac nous n'avons à signaler, outre les cuvettes et les barres déjà décrites, qu'un seul accident, mais il est très fortement prononcé et très évident. C'est ce qu'on appelle les Hauts-monts, au large de Corsier, à peu près à 1/3 lac sur la rive gauche. C'est un promontoire sous-lacustre qui se détache de la pointe de Bellerive en se dirigeant obliquement à l'axe du lac, directement vers le nord. Son sommet, qui est sous 7.4m d'eau, est plus élevé de 7.8m que l'arête mousse qui le relie au rivage; il forme donc un îlot submergé. Un talus de 24 pour cent de pente borde les Hauts-monts du côté du nord; sur les autres faces ils sont moins escarpés. Cet îlot sous-lacustre est recouvert d'un grand nombre de blocs erratiques; près du sommet, l'un d'eux, connu sous le nom de Pierre des Hauts-monts, n'est recouvert que de 7.4m d'eau. L'on avait d'abord pensé que l'îlot était une moraine glaciaire. Mais le major Pictet qui a étudié cette localité avec grand soin lors de l'établissement de la carte, a constaté que le squelette de l'îlot est de mollasse. [1] Si le lac abaissait son niveau de 15m les Hauts-monts formeraient une île qui sortirait de l'eau de 7.6m.

En résumé, le lac Léman, considéré dans le relief en creux de sa région profonde, forme un seul bassin.

Il est divisé en deux parties : le Grand-lac et le Petit-lac.

Le Grand-lac est un bassin unique, large, profond, beaucoup plus profond dans sa région centrale que dans ses régions terminales, lesquelles constituent deux rampes régulières.

La rampe descendante du plafond du lac est formée par le cône d'alluvion du Rhône.

La plaine centrale est remplie par l'alluvion impalpable du Rhône et des autres affluents.

La rampe ascendante montre le relief primitif du bassin sans altération notable.

Le Petit-lac est peu large, peu profond, de profondeur assez uniforme; il est divisé dans le sens de sa longueur en une série de cuvettes peu marquées.

Le lac subit dans la région du Haut-lac un comblement progressif

[1] *A. Favre*. Description géologique du canton de Genève, II, 39. Genève, 1880.

dans le sens longitudinal par l'effet de l'avancement du cône d'alluvion du Rhône.

Sur ses côtes, le lac tend à être découpé par les cônes d'alluvion des affluents latéraux. Un seul est assez puissant pour être cité, c'est celui de la Dranse.

Le bassin du lac montre quelques accidents dus à l'orographie primitive de la vallée, mais ils sont peu importants et peu saillants.

Si quelques-unes de ces propositions peuvent paraître insuffisamment démontrées par la description que nous avons faite, elles trouveront leur justification pleine et entière dans les paragraphes et chapitres ultérieurs, où j'aurai souvent à revenir sur ces faits.

IV. **Les côtes du lac.**

Considérations théoriques. La bande de jonction entre le domaine des eaux et la terre ferme est un phénomène géographique compliqué qui appartient en partie à la terre par sa zone émergée, en partie au lac par sa zone inondée. Mais ces deux zones juxtaposées empiètent l'une sur l'autre par le fait des variations de hauteur des eaux ; elles réagissent l'une sur l'autre aux points de vue géologiques, biologiques, physiques, etc. Il est donc opportun de les considérer dans une étude d'ensemble, et je désignerai sous le nom général de *côte* la région comprenant la zone de la terre qui est modifiée par le lac, et la zone du lac qui est modifiée par la terre ferme.

La côte tout entière est puissamment travaillée par le jeu des éléments qui la façonnent et la modifient ; elle est soumise à deux actions opposées : l'érosion et l'alluvion. Ces deux actions sont complexes et peuvent se décomposer en plusieurs facteurs qui agissent dans divers sens ; nous les étudierons attentivement plus loin. Pour le moment je me borne à les définir au point de vue qui nous intéresse ici, pour la formation des côtes du lac :

L'érosion est la destruction des couches de la côte par les actions mécaniques et chimiques de l'atmosphère et du lac.

L'alluvion est la formation de nouvelles couches par la précipitation mécanique et chimique des matériaux en suspension ou en dissolution dans l'eau.

Erosion et alluvion, agissant alternativement dans le temps et dans

l'espace [1], créent sur les bords du lac cet ensemble spécial du relief géographique que j'appelle la côte.

Rivage et littoral.

La côte se divise en deux régions bien distinctes qui toutes deux appartiennent au lac; mais l'une lui est extérieure, l'autre seule fait partie du domaine des eaux.

Le *rivage* est la bande de terre qui entoure le lac de toutes parts, au-dessus de la nappe des eaux; travaillée par le choc des vagues, elle est délavée par elles, de telle sorte que les matières terreuses lui sont enlevées et que le sol n'est plus constitué que de roches, de galets et de sables. C'est la terre ferme lavée par l'eau.

Le *littoral* ou la région littorale du lac est la bande côtière du domaine des eaux, celle qui entoure le lac jusqu'à la profondeur limite de l'action des vagues, jusqu'à quelques mètres au-dessous de la nappe de l'eau. Autrement dit : le littoral est la région du lac qui est sous l'influence directe du mouvement mécanique des vagues.

Rivage et littoral se décomposent en zones parallèles, qui, par le fait des variations de hauteur des eaux, empiètent alternativement les unes sur les autres.

Pour les bien comprendre et les séparer, décrivons la côte dans sa composition théorique. Nous choisissons pour cela deux localités où les conditions du développement de l'appareil côtier soient bien en évidence.

Dans l'une, l'érosion agira avec toute sa puissance et sera l'agent souverain, constructeur de la côte; nous désignerons ce type sous le nom de côte d'érosion.

Dans l'autre, l'alluvion sera prédominante et déterminera le type de l'appareil côtier. Ce sera la côte d'alluvion.

Côte d'érosion.

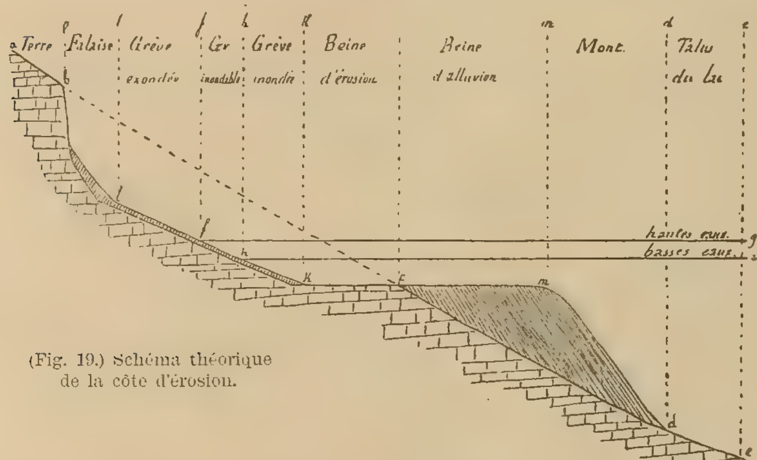
En général la formation de la côte est régie par l'érosion partout où l'alluvion d'une rivière ne trouble pas le jeu normal des actions méca-

(1) On me pardonnera cette expression d'importation germanique; sa concision la rend précieuse, et ce qu'elle a de délicieusement vague n'est pas un de ses moindres mérites.

niques du lac. La côte d'érosion existera donc sur toute la longueur de la rive qui n'est pas occupée par les deltas des affluents.

Nous allons étudier le développement théorique de ce type de côte. Le croquis ci-joint nous aidera à la compréhension des faits que je vais décrire. La ligne *a b c d e* (fig. 19) représente la coupe originelle du talus de la terre alors que le lac s'est établi sur la pente et a commencé à modeler la côte. L'horizontale *f g* est le niveau des hautes eaux, l'horizontale *h i* le niveau des basses eaux du lac.

La première action que nous ayons à considérer est celle de l'érosion. Sous les coups répétés des vagues les matériaux mobiles de la terre sont enlevés, et la partie émergée de la côte est excavée. Dissoutes chimiquement par les eaux, dissociées physiquement par l'eau



(Fig. 19.) Schéma théorique de la côte d'érosion.

de pluie et l'eau du lac, désagrégées par les alternatives du gel et du dégel, séparées mécaniquement par le choc des flots, les parties meubles de la terre sont enlevées et entraînées dans le lac. La côte est ainsi excavée, et cette excavation progresse en avançant dans la terre ferme.

L'excavation ainsi formée *c k h f l b* (fig. 19) se décompose en trois parties :

a Une paroi d'éboulement, la falaise *b l*; elle doit son origine à l'effondrement naturel des couches de la terre ferme à mesure que leur pied est sapé par les vagues. Suivant la nature plus ou moins résistante de la roche qui constitue le sous-sol, la paroi est plus ou

moins verticale ou inclinée. En général, sauf dans les terrains trop fluents, le haut de la falaise, formé de roche en place, est presque vertical, et à sa partie inférieure les matériaux éboulés s'établissent en un talus de moins en moins incliné ; ils s'étalent sur la grève et sont balayés par les vagues. La falaise s'accroît en hauteur à mesure qu'elle pénètre plus avant dans la terre ferme. La falaise étant formée par la surface libre de la roche en place, érodée mais non modifiée par l'eau du lac, elle appartient bien au rivage par son mode de creusement, mais par sa constitution elle fait encore partie de la terre ferme.

b La grève *lk*.

c La beine d'érosion *kc*.

Je vais reprendre la description de ces deux dernières parties.

La *grève*. Au pied de la falaise s'étend une zone d'inclinaison moyenne *lk*, sur laquelle les vagues déferlent et qui est lavée par elles. Elle porte le nom de grève, elle est recouverte d'une couche de galets et de sables, et se continue dans le lac jusqu'à un mètre ou deux sous les eaux.

La grève est un élément commun à la côte d'érosion et à la côte d'alluvion ; nous la retrouverons dans ce second type d'appareil côtier.

La pente de la grève plonge vers le lac ; son inclinaison, et par suite sa largeur varient d'un point à l'autre. Les facteurs qui les font varier sont :

α La grosseur des matériaux : là où la grève est recouverte de galets ou de graviers sa pente est plus forte que sur les plages sableuses.

β L'exposition de la côte au choc des grandes vagues. Plus les vagues qui travaillent la grève sont fortes, plus la pente est faible, et par conséquent plus la largeur de la zone est considérable.

γ La largeur générale du système côtier intervient aussi pour déterminer la pente de la grève. Là où la terrasse horizontale immergée que nous allons décrire sous le nom de beine est de grande étendue, la grève a, toutes choses égales, une pente faible. Là où le lac s'approfondit rapidement et a un talus très incliné, la grève est peu large et a une forte inclinaison.

La pente de la grève varie dans les limites de 10 à 20 %.

Sur les bords du Léman sa largeur varie de 5, 10 à 60 ou 80^{m}. Ces

très grandes largeurs ne sont représentées que dans les côtes d'alluvion ; sur la côte d'érosion la grève n'a guère plus de 5 à 10^{m}.

Le sous-sol de la grève est formé par la roche en place du terrain primitif attaqué par l'érosion.

En quelques localités, on peut voir parfois le sous-sol à nu, lorsque les vagues, au lieu d'amener des galets et des sables comme c'est leur office ordinaire, ont enlevé les matériaux de transport. C'est du reste l'exception. Dans la règle, dans la grande majorité des cas, la grève est recouverte d'une couche plus ou moins épaisse de galets, de graviers ou de sables apportés par les vagues. Suivant les temps et les lieux, le sol de la grève est formé :

Ou bien de sables, quelquefois très fins, parfaitement lavés.

Ou bien de graviers distribués en zones, selon leur grosseur ; les vagues effectuent un décantage mécanique qui porte plus ou moins loin tel ou tel calibre de graviers.

Ou bien de cailloux ou galets constituant un pavé continu. Nous aurons à décrire plus longuement cette formation à propos des ténevières de la beine ; nous la notons simplement ici.

Ou bien de blocs erratiques, restes des moraines dont les parties meubles ont été enlevées par les vagues.

Ou bien de roches en place, calcaires, poudingues, mollasses, marnes, argiles, mises à nu par l'érosion.

Ou bien encore la grève est recouverte de monceaux plus ou moins épais de poussières lacustres, débris de végétaux et d'animaux accumulés par les vagues.

Parfois sur la même grève deux ou plusieurs types de sol peuvent se trouver juxtaposés.

Quant à leur origine, il y a lieu de distinguer entre les matériaux de la grève :

Les roches en place, les blocs erratiques, les cailloux sont des parties qui ont résisté à l'action d'érosion du lac ; ils n'ont pas encore été usés et amenuisés par le frottement mécanique et par la dissolution chimique des eaux ; ils sont des témoins persistants de l'ancien sol qui constituait la muraille du lac.

Les graviers et sables au contraire sont plutôt un terrain de transport ou d'alluvion. Une partie d'entr'eux résultent bien, il est vrai, de la trituration des roches en place et des anciens matériaux du sol, mais la plus grande partie provient du transport des rivières. L'allu-

vion que les affluents déposent à l'embouchure de leur delta est en effet entraînée par le mouvement des vagues et promenée le long de la grève ; elle est charriée souvent fort loin de la bouche du torrent et est rejetée sur la grève. L'importance de ce dépôt torrentiel varie d'une côte à l'autre ; elle décroît à mesure que l'on s'éloigne de la rivière. Mais en général je puis attribuer à un transport de l'alluvion torrentielle, remaniée par les vagues du lac, la majeure partie des sables et graviers qui recouvrent la grève.

Je divise la grève en trois zones qui vont de l'extérieur à l'intérieur, de la terre au lac :

La grève exondée *l f* (fig. 19), qui n'appartient jamais au domaine du lac, et n'est atteinte et lavée que par les vagues de tempête.

La grève inondable *f h*, zone intermédiaire qui aux basses eaux est à sec et appartient alors au rivage, qui aux hautes eaux est inondée et appartient alors au littoral et par conséquent au lac.

La grève inondée *h k*, zone inférieure, qui même à l'étiage est recouverte par les eaux, et fait partie permanente du domaine du lac.

La *beine, k m* (fig. 19). Au-delà de la grève inondée s'étend une terrasse, plus ou moins large, sous une profondeur d'eau plus ou moins grande, mais toujours remarquable par son horizontalité presque parfaite ; elle ne s'approfondit pas ou presque pas et la sonde trouve presque la même hauteur d'eau sur toute la largeur du même profil de ce banc de sable côtier. Je suis obligé d'introduire pour cette terrasse un nom local, la beine, usité sur notre lac [1], par le fait que dans la langue scientifique nous n'avons aucune appellation qui désigne le fait géographique sur lequel j'attire l'attention des géologues. Cette terrasse littorale immergée existe en effet sur toute côte des lacs et des mers ; elle se développe plus ou moins partout où les vagues viennent frapper une rive ; elle est l'un des éléments les plus caractéristiques de la structure sous-lacustre ou sous-marine du littoral, et elle mérite d'être étudiée partout où des eaux dormantes sont en contact avec la terre ferme.

[1] Dans les lacs de la Suisse allemande la beine est appelée *die Wysse*, au lac de Neuchâtel le *blanc-fond*. Le nom de terrasse littorale auquel j'avais pensé aurait amené une confusion facile avec les terrasses fluvio-lacustres émergées, dans d'anciens rivages, sur les bords d'un lac dont la nappe aqueuse s'est affaissée ; j'aurais dû y ajouter le mot immergée. Terrasse littorale immergée eût été bien compliqué : le mot de *beine* est plus rapide et j'ose espérer qu'on voudra bien l'admettre.

La raison d'être de la beine réside dans la limite d'action des vagues. Celles-ci sont un phénomène de surface, dont l'intensité va rapidement en diminuant dans les couches sous-jacentes ; l'eau est agitée jusqu'à quelques mètres de profondeur, elle est calme plus bas. Au-dessus de cette limite le mouvement mécanique des vagues érode le sol, attaque les roches, les désagrège, les transporte, les emporte ; au-dessous de cette limite l'eau est calme et l'alluvion soulevée par les vagues se dépose sur le sol. Le courant de retour des vagues entraîne dans la direction du plein lac les grains de sable arrachés à la grève ; ils sont charriés de *k* en *m* et ils ne s'arrêtent qu'au-delà du point *m* où ils trouvent une profondeur suffisante pour que l'eau y soit calme et ne les tienne plus en suspension.

La profondeur de la beine est variable suivant l'exposition de la côte. Plus les vagues qui viennent y déferler sont puissantes, plus leur action est profonde, plus la beine est profonde aussi ; sur les plages bien abritées la beine est sous une faible épaisseur d'eau. Dans le lac Léman la profondeur de l'eau sur la beine varie de 1 à 4^{m} aux basses eaux.

J'ai dit que la beine est presque horizontale. Je dois souligner ce mot presque. Le transport des matériaux se faisant de la rive en plein lac, il y a en réalité une inclinaison dans la terrasse de la beine ; l'eau va légèrement en s'approfondissant du pied de la grève au bord libre de la beine.

On doit distinguer dans la beine, en y faisant intervenir la notion d'origine : une partie externe (par rapport au lac), au pied de la grève immergée *k c*, a été creusée par l'érosion dans l'ancien talus de la côte, c'est la beine d'érosion ; l'autre, la partie interne *c m*, a été formée par le transport successif des matériaux charriés par les vagues, c'est la beine d'alluvion. La limite entre ces deux parties n'est pas apparente à la surface de la terrasse, et ne deviendrait évidente que si l'on pouvait faire une tranchée dans le sol de la beine.

Le sol de la beine est en général recouvert d'une couche de sable fin, plus ou moins limoneux ; en certains points le sable est presque pur, formé de grains arrondis par leur frottement les uns sur les autres ; ailleurs il est vaseux. En fait d'accidents du sol on trouve au milieu de la beine d'érosion les pavés de cailloux et de galets que nous décrirons sous le nom de ténevières et les blocs erratiques, restes de l'ancien terrain de transport glaciaire dont les parties plus meubles ont été délavées par l'érosion.

Le sous-sol de la beine d'érosion est constitué par la roche en place des murailles du lac ou par le revêtement glaciaire qui la recouvre; le sous-sol de la beine d'alluvion est formé par les sables arrachés à la grève par l'érosion du lac et transportés par le courant de retour des vagues. Comme nous allons le dire en parlant du mont, le terrain de la beine d'alluvion est stratifié en couches inclinées plongeant vers le plein lac.

La beine est limitée en avant par un talus très incliné qui porte le nom local de mont, sa pente est de 10 à 30 ou 60 $^0/_0$. Il se relie à la beine par une crête convexe arrondie, mousse, et il se continue dans la profondeur jusqu'à ce qu'il rencontre par une pente concave arrondie le grand talus général du lac. Dans la fig. 20 je donne, à la même échelle pour les longueurs et les profondeurs, la coupe de quelques talus du mont devant Morges. La ligne *a a* figure le niveau des basses eaux, la coupe *b* le profil du mont dans l'alignement de l'axe de l'église, la coupe *c* dans l'alignement de la Saulnerie, la coupe *d* dans l'alignement de la fabrique Redard, la coupe *e* dans l'alignement de la ruelle Monod.

(Fig. 20.) Quatre profils du mont devant Morges 1 : 2500.

Le mont est un talus d'éboulement sous-aquatique de matériaux sableux. En voici le mode de formation : Le courant de retour des vagues charrie sur la beine les sables arrachés à la grève ; il les transporte jusqu'à la limite d'action des vagues et les laisse déposer au point même où l'agitation de l'eau cesse de les tenir en suspension. C'est donc sur le bord antérieur de la beine (au point *m*) que se fait ce dépôt, qui s'accumule aussi longtemps qu'il reste à l'état d'équilibre. Mais lorsque la poussée des matériaux entassés dépasse l'adhérence des particules sableuses qui le constituent, le nouveau dépôt s'éboule le long de la pente et s'étale sur le talus. Il se fait alors un de ces effondrements ou coulées que les riverains ont souvent l'occasion de constater. Nous en citerons plus loin quelques exemples. Il en résulte que le talus du mont s'avance en empiétant sur le domaine du lac à mesure que de nouveaux matériaux sont apportés ; que ces matériaux sont distribués en couches inclinées à la pente du talus naturel d'éboulement sous-aquatique ; que le sous-sol de la beine d'alluvion est formé par les couches sableuses stratifiées parallèlement à ce talus d'éboulement, c'est-à-dire inclinées vers le lac suivant une pente de 40-60 $^0/_0$. Plus les grains de sable sont grossiers plus la pente est inclinée ; plus l'alluvion est menue plus la pente est douce.

La beine tend sans cesse à s'élargir, d'une part aux dépens de la terre ferme par le déchaussement de la falaise, d'autre part du côté du lac par l'avancement du talus du mont.

La limite antérieure de la beine apparaît parfois d'une manière très frappante. Si d'une hauteur qui domine le lac on regarde la côte par un beau jour de printemps, alors que l'eau est transparente et qu'une brise assez fraîche supprime par ses vaguelettes les reflets du miroir des eaux, on voit l'eau bleue azurée du profond du lac bordée vers le rivage par une zone verdâtre, claire, nette et distincte ; c'est la beine dont la faible profondeur permet à l'œil de voir le fond et d'en mélanger la teinte jaunâtre avec la couleur bleue de l'eau. La ligne de séparation est très tranchée là où le talus du mont est fort incliné ; elle est confuse et indistincte là où le mont se prolonge longtemps en une pente douce.

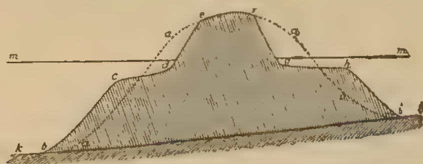
La figure 21 représente à l'échelle de 1 : 4000e, avec même réduction



(Fig. 21.) Profil de la beine devant Morges 1 : 4000^{e}

pour les hauteurs et les longueurs, le profil de la beine et du mont devant la ville de Morges : *a b* est la beine, *b c* le mont, *c d* le talus général du lac, *e e* la nappe des eaux.

L'expérience suivante montre bien le mécanisme de la formation de la falaise, de la beine et du mont : Le 24 septembre 1874 j'étudiais les seiches du lac de Morat sur la plage de sable remarquablement fin que l'abaissement artificiel du lac a laissée à sec, à l'angle N.-E. du lac. Le lac était au calme plat et de très faibles vagues mortes à peine sensibles venaient battre la rive. Je bâtis, par quelque dix centimètres de profondeur d'eau, une île artificielle de deux ou trois décimètres carrés, formée de sable très fin. Les vagues venant la battre creusèrent



(Fig 22.) Formation expérimentale de la côte.

bientôt une falaise et au bout d'un quart d'heure mon île avait la coupe que donne la fig. 22 : la ligne pointillée *a a a a* reproduisant le dessin

de l'île primitive, la ligne brisée *b c d e f g h i* représente l'île façonnée par les vagues, entourée d'un mont *bc hi*, d'une beine *cd gh* et creusée d'une falaise *de fg*; *mm* est le niveau de l'eau, *kl* le sol sur lequel s'élève l'île.

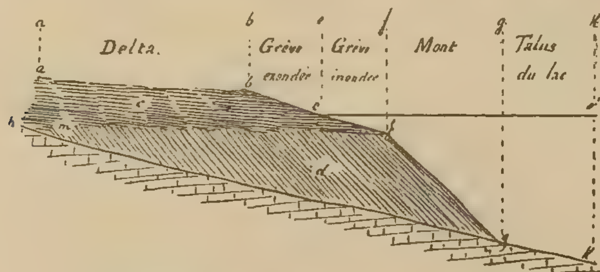
Côte d'alluvion.

Le procès de formation du littoral se présente sous un second type, fort différent de celui que nous venons de décrire et que nous désignons sous le nom de côte d'alluvion. En effet, le transport d'alluvion d'un affluent peut être assez puissant pour dépasser en activité la faculté d'érosion et de transport des vagues ; les matériaux meubles de l'alluvion fluviatile s'accumulent alors autour de l'embouchure et forment un cône d'alluvion émergé qui porte le nom de delta ; c'est une pointe de terre basse, à avancement progressif qui fait toujours davantage saillie dans le lac. Le delta protège la rive contre l'érosion et il ne se forme plus de falaise. Si le delta s'allonge plus rapidement que les matériaux ne sont charriés en avant par les vagues, la beine peut se réduire à peu de chose ou à rien ; cela a lieu particulièrement sur un littoral où le talus général du lac est très incliné ; le talus du mont y prend bien vite un développement tel qu'il absorbe énormément de matériaux pour une faible progression en avant, et l'élargissement de la beine y est excessivement ralenti. A mesure que le delta s'allonge dans le lac, la pente de la rivière diminue et la faculté de transport de ses eaux s'affaiblit ; il en résulte un dépôt de matériaux sur la surface du delta. Il se forme ainsi sur ce qui était autrefois le domaine du lac, un cône torrentiel émergé, à couches relativement peu inclinées qui reposent sur les couches plus inclinées de l'ancien talus du mont.

Le profil de la côte sur un delta de rivière est donc essentiellement différent de celui d'une côte en falaises. Il se résume dans les parties suivantes, fig. 23 : De *a* en *b* est le delta, pointe de terre basse de forme triangulaire mousse, constitué à la surface par des couches d'alluvion très peu inclinées *c* ayant la pente de l'alluvion torrentielle émergée, dans la profondeur par les couches d'alluvion très fortement inclinées *d* de l'ancienne surface libre du talus du mont. De *b* en *f* la grève qui se décompose en grève exondée *b e* au-dessus des eaux, et en grève inondée *c f* au-dessous de la nappe du lac ; entre deux est la grève inondable que j'ai décrite plus haut, mais que je ne figure pas

dans mon croquis, pour simplifier. C'est à la hauteur de la lettre *f*, au bas de la grève, que correspond le plan limite *m f* entre les couches peu inclinées de la surface du delta et ses couches profondes fortement inclinées; c'est à quelques décimètres au-dessous des basses eaux du lac que s'établit ce plan très reconnaissable dans les coupes des anciens deltas du lac mis à sec dans les terrasses que nous décrirons plus tard. Au-devant de la grève s'étend le talus du mont *f g* qui descend en pente inclinée jusqu'à sa rencontre avec le talus général du lac *g k*, suite des murailles primitives du bassin *h k*.

Le mont d'un cône d'alluvion immergé ne diffère pas par sa forme du mont qui limite en avant la beine d'une côte d'érosion. Il en diffère cependant par sa constitution : Les matériaux charriés sur la beine par le courant de retour des vagues ne sont que des sables fins ou de la vase; le mont de la beine ne renferme donc pas de graviers ni de



(Fig. 23.) Schéma théorique d'une côte d'alluvion, ou delta.

galets, et une coupe de la beine, si celle-ci était mise au jour, ne rencontrerait que des sables fins. Les matériaux, au contraire, apportés par l'affluent nourricier du delta peuvent être très grossiers; ils varient en tous cas de grosseur suivant l'état de l'affluent qui, à l'étiage charrie à peine des sables fins, en crue de débordement transporte des graviers, des galets, des blocs; tous ces matériaux amenés dans le lac s'étalent, par le mécanisme que j'ai décrit, sur le talus du mont; il en résulte que la surface du mont et les couches profondes du delta sont constituées par des couches alternativement fines et grossières, de grosseur très variable, depuis les sables les plus fins jusqu'aux galets les plus volumineux que l'affluent est capable de transporter.

Je veux encore signaler trois faciès spéciaux des côtes dont nous avons des représentants sur les rives du Léman, à savoir les lagunes, les dunes et les moraines littorales.

Les *lagunes* se développent au fond de golfes envahis par l'alluvion sur un talus peu incliné. Là où l'alluvion est dominante, sur les flancs d'un delta de rivière à transport puissant, ou bien au fond d'un golfe peu profond où se déverse une rivière, l'alluvion envahit le domaine du lac. Les vagues ordonnent les sables et graviers en bancs parallèles à la rive, qui ne tardent pas à s'exhausser, à sortir des eaux en laissant entre eux et le rivage un étang, une lagune. Il y a alors formation d'un cordon littoral, d'un véritable lido avec la lagune derrière lui. Nous en avons des exemples aux Grangettes de Villeneuve, aux Pierrettes d'Ouchy, sur les flancs des deltas du Boiron de Morges, de l'Aubonne, de la Promenthouse, dans la plaine de Genthod, au fond du golfe de Coudrée, etc.

Depuis quelques années j'assiste à la formation nouvelle de ces barres au fond du golfe de Préverenges, entre les roseaux de Morges et l'embouchure du Bief; je vois les hauts-fonds parallèles à la rive se relever progressivement. Leur place est nettement indiquée par le jeu des vagues qui se resserrent lorsqu'elles traversent la barre pour s'élargir lorsqu'elles arrivent dans la lagune où l'eau est plus profonde.

Dunes. Dans le fond du golfe de Coudrée, entre le Foron et le Vion, et au-delà du Vion jusqu'aux falaises d'Excenevex, (1) il s'étend une plaine couverte de superbes dunes de sable fin; sur la rive droite du Vion elles sont masquées par la forêt de Coudrée, sur la rive gauche elles sont à nu, recouvertes d'une flore spéciale de buis, épine-vinette, genévriers, asperges, œillets, etc. Elles atteignent jusqu'à 3 et même 5 mètres de hauteur, et ont la forme et les allures caractéristiques de la vraie dune. Sous l'action du vent elles sont mobiles, et le 27 août 1878 j'en ai vu une qui s'était déplacée en traversant et recouvrant en partie un ancien chemin. Le sable de ces dunes a la structure spéciale que j'ai constatée dans tous les sables des dunes aériennes; les grains roulés par le vent les uns sur les autres se sont émoussés, arrondis et ont la forme de sphérules presque parfaites.

Les *moraines littorales.* Lorsque l'érosion du lac attaque un sol de terrain glaciaire composé d'argiles à cailloux, de sables, de pierres et de blocs, elle enlève les matériaux ténus et meubles, mais elle ne peut déplacer les grosses pierres. Celles-ci restent sur la beine comme témoins de l'ancienne nature du sol. C'est ce qui explique les nombreu-

(1) C'est par erreur que la carte suisse écrit Excenevrex.

ses moraines immergées, avec blocs erratiques formant récifs, sortant plus ou moins de l'eau, qui se rencontrent sur plusieurs des rives du Léman. Je citerai comme exemples les moraines littorales d'Yvoire, de la côte de Préverenges, etc.

Des faits exposés il résulte que, dans la zone côtière, nous avons en présence simultanément et concurremment l'action d'érosion et l'action d'alluvion. L'érosion excave la côte et creuse la falaise et la beine d'érosion, laissant en place les moraines littorales. L'alluvion ordonne les dépôts sableux de la beine d'alluvion avec son talus d'éboulement, le mont : l'alluvion fluviatile bâtit la partie émergée des deltas, l'alluvion fluvio-lacustre leur partie immergée : l'alluvion enfin établit les cordons littoraux, leurs lagunes et les dunes qui peuvent les combler.

Description hydrographique des côtes du Léman.

Reprenons maintenant les côtes du lac et faisons-en une description générale, qui comprendra ainsi la région littorale, sur les bases que nous venons d'établir.

Si nous partons des bouches du Rhône, ou plutôt du Bouveret, en longeant la côte suisse, nous trouvons successivement :

1° La plaine du Rhône du Bouveret à Villeneuve. C'est le delta d'alluvion du Rhône, fleuve alpin à puissant transport. Il charrie des galets, des sables et de l'alluvion impalpable. Dans la série des âges, ses embouchures ont divagué sur toute la largeur de la plaine. Depuis les temps historiques, elles sont localisées sur le bord occidental de la vallée, à la place occupée actuellement par la grande bouche du Rhône, à 800^{m} du Bouveret, et au Vieux-Rhône, 800^{m} plus loin.

Ce rejet vers le côté occidental des bouches du fleuve fait avancer le delta notablement plus loin sur la côte valaisanne que sur la côte vaudoise, et le cône immergé est fortement asymétrique. A propos du plafond du lac nous avons vu que les courbes isobathes font beaucoup moins saillie du côté du Bouveret que devant Villeneuve.

Les gros galets, dont le volume atteint la grosseur d'un œuf, du poing ou même d'une tête d'enfant, sont déposés à la bouche principale du Rhône et forment une pointe basse à droite et à gauche du chenal du fleuve; la grève exondée avance à peu près également de chaque côté; mais sur la rive gauche un banc de sable immergé par les hautes eaux fait une saillie considérable.

Les sables sont charriés par les vagues le long de la côte. Entraînés surtout par les vagues du vent sudois qui viennent de l'ouest, ils arrivent jusque près de Villeneuve et forment, au devant de la grève, une beine très étendue mesurant par places jusqu'à 1^{km} de largeur. Le front de cette beine n'est pas rectiligne ; il forme une série d'éperons, au nombre de 5 ou 6, plus ou moins saillants, désignés par l'appellation locale d'*arans*. Ceux-ci se voient sur les courbes isobathes jusqu'à la profondeur de 50^{m} et plus. Le plus considérable, situé au devant des Grangettes, limite à l'ouest le golfe de Villeneuve ; c'est sur cet aran qu'est bâti l'îlot de Peilz. Les sables du Rhône sont très fins et le mont, qui s'établit au devant de la beine, a une pente fort douce ; mesurée jusqu'à l'isobathe de 85^{m}, son inclinaison moyenne n'est que de 16 pour cent, ce qui est fort peu.

Outre les galets et les sables, le Rhône charrie une masse énorme d'alluvion impalpable qui est entraînée au loin dans le lac, jusque dans la plaine centrale, comme nous le verrons quand nous ferons la théorie du ravin sous-lacustre du Rhône. Une partie de cette alluvion impalpable se dépose sur le cône immergé et forme la rampe descendante du plafond du lac. Nous en avons suffisamment décrit l'inclinaison. Dans la fig. 24 je donne le profil du cône d'alluvion immergé

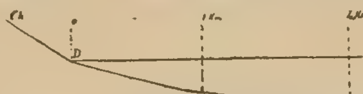


(Fig. 24.) Profil du cône sous-lacustre du Rhône. 1 : 50 000e.

du Rhône à l'échelle de 1 : 50 000e. On y voit la lenteur de l'approfondissement du lac, la faible déclivité de la pente.

2° De Villeneuve à Ouchy, la côte du lac forme une muraille rocheuse fort inclinée qui se continue sous les eaux par un talus également fort raide. La côte terrestre est cependant loin d'être verticale. Dans sa partie la plus rapide, au signal de Chexbres, par exemple, sa pente ne dépasse pas 50 pour cent, soit un angle de 26°. Nous avons vu que les talus sous-lacustres avaient des valeurs à peu près du même ordre.

La fig. 25 à l'échelle de 1 : 25 000e donne le profil du signal de



(Fig. 25.) Profil de la côte et du talus devant Chexbres et le Désaley. 1 : 25 000e.

Chexbres jusqu'au fond du lac en passant par le Désaley. L'œil reconnaît difficilement dans ce croquis les rampes très raides que nous connaissons en nature. En réalité elles ne sont pas plus inclinées que cela.

Quoi qu'il en soit de cette représentation, nous pouvons dire que les murailles émergées de la vallée et celles du lac sont, dans cette région du Haut-lac, relativement fort inclinées; les murailles, consistant en roches calcaires, en poudingues et en grès, sont difficilement attaquables par l'érosion lacustre; la falaise y est verticale et empiète fort peu sur la terre. La grève y est peu large et elle est fort inclinée, formée d'un cailloutis grossier avec peu de sable. La beine y est presque nulle à l'exception de quelques golfes peu profondément découpés, golfes de Vevey, de Creux de Plan, de Pully, etc. Le mont, qui se développe sur un talus général à grande déclivité, se confond presque avec celui-ci et les deux ensemble se prolongent en une pente uniforme jusqu'aux grands fonds du lac.

Cette côte est coupée par quelques deltas torrentiels qui présentent, eux aussi, des caractères spéciaux : je citerai ceux de la Tinière, de la Veraye, des bayes de Montreux et de Clarens, de la Veveyse, de la Lutrive. Ces rivières, descendant par une pente très raide de montagnes fort escarpées, n'ont ni un cours prolongé, ni un vaste bassin d'alimentation; à l'étiage elles n'ont que peu d'eau. Mais, gonflées par les pluies d'orage, avec la pente très accentuée de leur lit, elles prennent les allures de torrents et charrient un fort bagage d'alluvion grossière, caillouteuse, galets et pierres qui forment au-dessus du lac un cône torrentiel assez incliné.

Le cône sous-lacustre de ces torrents est assis sur un talus très profond et se développe dans le lac en un cône bien dessiné à génératrice fort inclinée. Leur pente moyenne est :

Pour le cône lacustre	de la Veraye,	0.52
»	de la baye de Montreux,	0.48
»	de la baye de Clarens,	0.45
»	de la Veveyse,	0.45

soit généralement de 45 à 50 pour cent.

3° D'Ouchy à Genève la côte a des allures fort différentes. Les murailles du lac sont beaucoup moins inclinées, la pente générale de la terre ferme est beaucoup plus douce, et les talus sous-lacustres

sont beaucoup moins déclives. Je donne dans la fig. 26 le profil de la côte, passant par le signal de Bougy, Perroy et le lac, au 1 : 100 000e; la pente est presque insensible, dans le lac du moins.

La terre ferme est, sauf quelques points où apparaissent les mollasses et les marnes tertiaires, très généralement composée par un revêtement de terrains glaciaires ou par les graviers des terrasses fluvio-lacustres des anciens niveaux du lac; elle est facilement attaquable et l'érosion du lac y creuse des falaises parfois très bien marquées. La grève y est plus large, à pente plus douce que dans le Haut-lac; elle



(Fig. 26.) Profil de la côte et du talus par le signal de Bougy et Perroy. 1 : 100 000e.

est généralement recouverte d'un sable fin. La beine y est parfois étendue et bien marquée: au fond des golfes des Pierrettes, de Morges, de Rolle, etc.; elle mesure souvent 400 ou 500m de large. Au devant de la beine, le mont, qui se développe sur un talus général du lac peu incliné, se dessine fort nettement par la pente bien accusée d'un talus d'éboulement du sable.

Quant aux deltas de rivières, ils sont relativement assez considérables. Les affluents principaux, la Venoge, la Morge, le Boiron, l'Aubonne, la Promenthouse, la Versoie ont un bassin d'alimentation important, et lorsqu'ils sont gonflés par la fonte des neiges ou par les pluies d'automne, ils charrient un grand volume d'eau. Mais la pente de leurs cours est peu inclinée; aussi, s'ils transportent beaucoup d'alluvion, les matériaux en sont peu volumineux : ce sont des graviers plutôt que de gros galets ou de grosses pierres. D'une autre part, le talus général du lac sur lequel s'établit le cône d'alluvion est peu déclive, par conséquent le delta est dans de bonnes conditions pour se développer assez vite et former une pointe émergée assez importante. Les deltas des rivières de cette partie du lac font une saillie bien marquée sur les côtes du lac. — Notons déjà ici que les terrasses fluvio-lacustres des anciens niveaux du lac compliquent souvent la structure du delta émergé, comme nous le verrons plus loin.

4o Sur la côte de Savoie, entre le Bouveret et Evian, dans le Haut-lac savoyard, nous avons des conditions à peu près analogues à celles du Haut-lac vaudois sur la côte nord. Terre ferme rocheuse très abrupte,

talus du lac très inclinés et très profonds. Peu de falaises, grève caillouteuse peu large, pas de beine. Il y a sur cette côte un seul delta torrentiel, celui de la Morge de St-Gingolph, comparable en tous points à ceux des torrents du district de Vevey. Sa pente est de 55 pour cent.

5° Entre Amphion et Thonon s'étend l'énorme delta de la Dranse, de 2^{km} de saillie sur la côte, de 10^{km^2} de superficie dans la partie émergée. Il est le plus important du lac après celui du Rhône ; il a tous les caractères typiques que nous avons décrits dans nos généralités. La pente de son talus est de 40 pour cent.

6° De Thonon à Yvoire est un golfe large et profond, la Grande-Conche, au fond duquel les alluvions de deux ruisseaux, le Redon et le Foron, ont formé un cordon littoral avec des lagunes, et une plaine sableuse avec des dunes. C'est le seul point du lac où je connaisse cette dernière formation.

7° La pointe d'Yvoire est remarquable par le beau développement de ses falaises et par la moraine de gros blocs glaciaires qui apparaît sur la beine, moraine littorale.

8° De Nernier à Genève la côte ne présente à signaler, en fait de de détail important du relief, que le promontoire immergé des Hauts-monts ; je l'ai décrit plus haut.

Je veux encore indiquer dans la rade de Genève la formation des arans que j'ai décrite à propos de la côte de la plaine du Rhône (page 83). Je rappelle que nous appelons arans des promontoires immergés, plus ou moins obliques à la ligne du rivage, qui s'avancent sur le bord libre de la beine ou apparaissant sur la beine elle-même ; ce sont des hauts-fonds sur sol d'alluvion. L'on voit fort bien cette formation des arans sur la belle carte de la rade de Genève levée en 1880 par E. Merle d'Aubigné. (1) Sur la rive gauche on reconnaît cinq pointes sous-lacustres s'avançant plus ou moins en avant ; sur la rive droite il n'y en a que deux. La saillie de ces arans de Genève est peu considérable, elle n'est que de 30 à 50^{cm} au plus : mais ils n'en sont pas moins très bien visibles sur cette carte à grande échelle où les courbes horizontales ont une équidistance de 10^{cm} seulement.

Je résumerai la nature des côtes du lac Léman en suivant ses

(1) Plan de situation du Banc de Travers d'après les sondages faits en février et mars 1880.

rivages et en indiquant les caractères généraux de l'appareil côtier tel qu'il se développe successivement en partant des bouches du Rhône :

Rive droite. Des bouches du Rhône à Villeneuve. Plaine du Rhône,	Côte d'
Delta du Rhône,	alluvion.
Delta de la Tinière,	id.
De Grandchamp à Veytaux, côte rocheuse,	érosion.
Veytaux, delta de la Veraye,	alluvion.
Golfe de Territet,	érosion.
Delta de la baye de Montreux,	alluvion.
Golfe de Vernex,	érosion.
Delta de la baye de Clarens,	alluvion.
Du Basset à Vevey,	érosion.
Delta de la Veveyse,	alluvion.
De Corseaux à Lutry, (1)	érosion.
Delta de la Paudèze,	alluvion.
De Pully à Cour sous Lausanne,	érosion.
Delta du Flon,	alluvion.
Golfe des Pierrettes, embouchure de la Tsamberonne, lagunes,	id.
Pointe de St-Sulpice, falaises,	érosion.
Delta de la Venoge,	alluvion.
Côte de Préverenges, falaises,	érosion.
Delta du Bief,	alluvion.
Delta de la Morges,	alluvion.
Côte de l'ancienne Poudrière, falaises,	érosion.
Delta du Boiron,	alluvion.
Fraid'aigue, falaises,	érosion.
Pointe de St-Prex, ancien delta,	alluvion.
Golfe de la Moraine, falaises,	érosion.
Pointe de Coulet, ancien delta,	alluvion.
Côte de Buchillon et de Fontanettes, falaises,	érosion.
Pointe de Chanivaz, delta de l'Aubonne,	alluvion.
Sous la Gordanne,	stationnaire.

(1) Cette partie, toute en côte d'érosion, est interrompue à Cully par une pointe d'alluvion formée par le transport du petit ruisseau torrentiel, la Gérine.

Delta du ruisseau le Rupalet,	alluvion.
De Rolle à Fleur d'eau,	stationnaire.
De Fleur d'eau à la Bergerie, falaises,	érosion.
Delta de la Promenthouse,	alluvion.
Golfe de Nyon,	stationnaire.
De Nyon à Crans, falaises,	érosion.
De Crans à Coppet,	stationnaire.
De Coppet à Myes, falaises,	érosion.
De Myes à Genthod,	stationnaire.
Pointe de Genthod, delta de la Versoie,	alluvion.
Bellevue, falaises,	érosion.
Genève.	

Rive gauche. Des bouches du Rhône au Bouveret.

Plaine du Rhône,	alluvion.
Du Bouveret à St-Gingolph,	érosion.
Delta de la Morge de St-Gingolph,	alluvion.
De St-Gingolph à Amphion,	stationnaire ou érosion.
Pointe de la Dranse, delta moderne,	alluvion.
Ripaille, terrasses lacustres, falaises,	érosion.
De Thonon à Anthy, terrasses lacustres,	stationnaire.
Anthy, Coudrée, Excenevex, lagunes et dunes,	alluvion.
Excenevex à Nernier, falaises dans l'argile glaciaire,	érosion.
De Nernier à Genève, côte d'érosion interrompue par les deltas de quelques ruisseaux qui forment entre autres la pointe de Messery, celle de Beauregard, nant de Vecheux, celle d'Hermance, la pointe de la Bise, etc.,	érosion.

Enfin nous terminerons cette description du littoral du lac en rappelant les quatre îles, ou plutôt les ilots du lac, tous artificiels, bâtis de la main de l'homme, tous quatre du reste de dimensions minimes.

1° L'îlot de Peilz[1] devant Villeneuve, a été construit, déjà dans le siècle dernier, sur un haut fond sableux de la beine; [2] les murs nécessitaient déjà des réparations au commencement du XIXe siècle,

[1] C'est bien là l'orthographe indigène qui se retrouve sur tous les actes de Villeneuve; le dictionnaire Martignier et la carte fédérale au 1 : 100 000e écrivent par erreur *île de Paix*.

[2] Le dictionnaire Martignier la dit bâtie sur un rocher. C'est une erreur manifeste.

ce qui en prouve l'antiquité. L'enrochement qui soutient ces murs du côté du nord et de l'ouest est protégé par des pilotis. L'îlot est de forme carrée, de près de 9^{m} de côté et il mesure 77^{m2} de superficie. (1)

2° La Roche aux mouettes, devant le Basset, entre Clarens et la Tour-de-Peilz, à 125^{m} du rivage et à 375^{m} à l'ouest de la baie de Clarens, était un récif rocheux émergé aux eaux moyennes du lac. Il a été enceint de murs en 1885 et forme aujourd'hui un îlot de 1600^{m2}.

3° L'île de Rolle était une ténevière (2) naturelle ou artificielle, banc de gravier émergé aux basses eaux, station d'un ancien palafitte de l'âge du bronze. Elle a été entourée de murs en 1838, et forme aujourd'hui un terre-plein d'un demi-hectare, au milieu duquel s'élève un obélisque en marbre blanc, portant le médaillon, sculpté par Pradier, du général F.-C. de la Harpe, l'ancien précepteur d'Alexandre Ier de Russie, l'un des fondateurs de l'indépendance du canton de Vaud.

4° L'île Verte, à Choisy sous Bursinel, îlot artificiel, entouré de murs, planté d'arbres, sur un haut-fond à 70^{m} de la rive, mesure environ 50^{m2} de superficie.

V. **Théorie géographique des côtes.**

Si nous étudions la formation des côtes actuelles du lac, ou leur développement hypothétique dans la supposition de variations systématiques dans le niveau de l'eau, nous arriverons à quelques lois qui peuvent avoir de l'intérêt pour diverses questions de géographie générale. (3)

I. Je considèrerai d'abord la formation des golfes et pointes sur les rives d'un lac dont le niveau reste stationnaire ou ne présente que des variations de courte périodicité, annuelles ou saisonnières.

La côte non protégée par un rempart d'alluvion est attaquée par l'érosion ; les vagues, la sapant à chaque tempête, y creusent une falaise de plus en plus profonde qui pénètre de plus en plus dans la terre ferme ; les matériaux de déblai sont charriés dans le lac jusqu'au

(1) Je tiens ces renseignements de M. D. Joly, à Villeneuve, *in litt.* 11 fév. 1891.
(2) Voir plus loin l'explication du mot *ténevière*.
(3) *F.-A. Forel.* Thèses de géographie physique. Bull. S. V. S. N. X. 468, Lausanne 1869.

bord du mont et, se déposant au fond de l'eau, y constituent la terrasse horizontale que nous avons nommée la beine. L'érosion du lac a donc pour effet, aux points où elle est dominante, de reculer le rivage et d'augmenter le domaine des eaux.

Au contraire, là où quelque rivière se jette dans le lac, l'alluvion fluviatile apportée par l'eau courante forme à son embouchure un atterrissement qui s'avance toujours plus, et constitue bientôt un promontoire d'alluvion, caractérisé par son peu de hauteur au-dessus du niveau du lac et par la présence du delta de la rivière à sa pointe saillante. L'alluvion des affluents a donc pour tendance, aux points où elle est dominante, de faire avancer le rivage et d'augmenter le domaine de la terre.

Par la continuité de ces deux actions, — l'alluvion des rivières qui forme et augmente les promontoires d'atterrissement, et l'érosion du lac qui creuse entre ces promontoires des golfes bordés de falaises, — le rivage se découpe toujours plus profondément et présente des sinuosités toujours plus prononcées.

En renversant ces propositions nous arrivons à la loi suivante :

Première loi. Partout où nous rencontrons un rivage découpé par des golfes bordés de falaises, séparant des promontoires d'alluvion avec les deltas des rivières à leur extrémité, nous devons conclure que, depuis un temps relativement assez long, les rapports de niveau entre la terre ferme et les eaux sont restés constants, que la terre ne s'est ni affaissée ni soulevée par rapport au niveau de la nappe liquide.

II. Si je suppose l'intervention d'une variation positive, (1) le niveau du lac s'élevant d'une quantité notable, de 50, 100, 150 mètres, la forme de ses côtes se modifiera sensiblement ; leur nature et leurs relations se transformeront.

Les eaux, pénétrant dans les vallées d'érosion de toutes les rivières

(1) Pour exprimer les changements relatifs du niveau de la terre par rapport à la nappe des eaux marines ou lacustres, suivant la terminologie de Suess, 1883, les géologues désignent par les mots de variation positive celle dans laquelle il y a élévation de la nappe des eaux ou affaissement du sol, et variation négative celle où il y a abaissement du niveau des eaux ou élévation de la terre. Le terme exact est déplacement positif ou négatif de la ligne des rivages *(positive oder negative Verschiebung der Strandlinie)* ; j'abrège en employant simplement le mot variation.

et de tous les ruisseaux qui se jettent dans le lac, formeront dans chacune de ces vallées un golfe étroit et allongé, s'avançant profondément dans l'intérieur des terres. Ces golfes seront des fiords et ils seront caractérisés par la présence du delta de la rivière dans leur partie la plus reculée.

Les collines qui séparaient les vallées des rivières ne seront pas submergées lors de l'exhaussement des eaux et formeront, entre les fiords, des caps relativement élevés, dont les bords, rongés par l'action des vagues, présenteront bientôt des falaises de plus en plus marquées.

La valeur de l'élévation des eaux sera donnée par la profondeur maximale de l'eau à l'entrée des principaux fiords de la nouvelle côte; la sonde arrivant sur ce qui, avant l'exhaussement des eaux, était le lit de la rivière, donnera une valeur minimale pour l'exhaussement des eaux ou pour l'abaissement de la terre.

En conséquence de ce que je viens d'exposer, je formule la loi suivante :

Seconde loi. Toute côte qui présente des fiords (golfes longs et étroits ayant le delta des rivières dans leur partie la plus reculée), séparés par des caps bordés de falaises, doit être considérée comme étant, par rapport au niveau de l'océan ou du lac, dans un état d'affaissement.

La valeur minimale de cette variation positive sera donnée par la profondeur maximale de l'eau mesurée à l'entrée des différents fiords.

III. Tandis que l'érosion des eaux courantes tend à diversifier la surface sub-aérienne du sol, l'alluvion du lac, charriée par les vagues et par les courants, tend à combler les inégalités du plancher de son bassin; le fond du lac présente remarquablement peu d'inégalités et d'accidents, ses talus eux-mêmes sont relativement peu découpés.

Si donc nous supposons une variation négative de la ligne des rivages, le niveau des eaux du lac s'abaissant de 20, 50 ou 100 mètres, la forme de la côte se modifierait sensiblement : au lieu d'être découpée par des promontoires d'alluvion comme elle l'est dans l'état actuel, au lieu d'être creusée par des fiords comme elle le serait dans la supposition d'une élévation du niveau des eaux, si le niveau des eaux s'abaissait, la forme des côtes deviendrait relativement régulière et peu accidentée. Les courbes isobathes de la carte hydrographique peuvent donner une idée de ce nouvel aspect de la rive.

La valeur de l'affaissement de la nappe du lac par rapport au niveau

actuel serait donnée par la hauteur des terrasses d'alluvion ; en effet, les plaines d'atterrissement de tous les affluents qui se jettent actuellement dans le lac seraient bientôt creusées par l'eau courante de leurs propres rivières, qui se formeraient bien vite un nouveau lit en rapport avec le nouveau niveau de leur embouchure. Mais les plaines d'alluvion actuelles ne seraient probablement pas enlevées dans leur entier, et il resterait par places des terrasses d'alluvion comme témoins de l'ancien niveau de la plaine. La hauteur de ces terrasses au-dessus du lit de nouvelle formation donnerait la valeur de l'affaissement du niveau du lac.

Réciproquement je puis formuler la loi suivante :

Troisième loi. Partout où nous trouverons une côte peu accidentée, ne présentant aux embouchures des cours d'eau ni fiords, ni promontoires d'alluvion, ne présentant pas non plus de falaises, nous conclurons que la terre est en état d'exhaussement au-dessus des eaux. La valeur maximale de cette variation négative est donnée par la hauteur minimale des anciennes terrasses d'alluvion au-dessus du niveau actuel des fleuves.

En résumé :

Une côte peu accidentée est l'indice d'un état d'exhaussement du sol par rapport au niveau des eaux (variation négative).

Une côte découpée est l'indice, ou bien d'un état de repos, de constance dans le niveau relatif des eaux et de la terre, ou bien d'un état d'abaissement du sol par rapport au niveau des eaux (variation positive).

L'on peut diviser naturellement les golfes en :

a Golfes proprement dits, bordés par des falaises, et limités latéralement par des promontoires d'alluvion.

b Fiords, présentant dans leur partie la plus reculée un delta de rivière, et limités latéralement par des caps bordés de falaises.

L'on peut de même diviser les pointes de terre en :

a Promontoires d'alluvion, formés par un delta de rivière et limités latéralement par des golfes.

b Caps, bordés de falaises et séparés par des fiords.

Dans une côte découpée par des pointes ou des golfes :

1° L'existence de golfes séparés par des promontoires d'alluvion est l'indice d'un état de constance dans le niveau relatif des eaux et de la terre.

2° L'existence de fiords séparés par des caps est l'indice d'un état d'affaissement du sol par rapport au niveau des eaux.

Sur notre lac je puis donner les exemples suivants de ces diverses formations géographiques : Sont des caps : les pointes d'Yvoire, de la Tour de Peilz. Sont des promontoires : les deltas du Rhône, de l'Aubonne, de la Dranse, de la Promenthouse. Sont des golfes : les golfes de Morges, des Pierrettes, de Rolle. Nous n'avons pas d'exemple de fiord. Les terrasses lacustres, comme celles du Boiron, près Morges, de Saint-Prex, de Thonon, permettent d'apprécier l'abaissement de la nappe des eaux depuis l'époque où les rivières bâtissaient leurs deltas à un niveau supérieur.

Si, à la lumière des lois ci-dessus énoncées, je considère le globe terrestre dans son ensemble, j'y reconnais des faits intéressants. Les côtes des continents équatoriaux sont remarquablement peu découpées et dénotent une variation négative de la ligne des rivages, un exhaussement de la terre par rapport à la mer ; les côtes des continents polaires, aussi bien les boréales que les australes, sont dentelées de fiords nombreux qui dénotent une submersion récente de la terre ferme, une variation positive. Il semble probable que l'océan a subi un déplacement, qui lui a fait quitter les régions tropicales pour envahir les régions polaires. Un tel changement dans les rapports de la terre ferme avec l'océan correspondrait à une diminution de la force centrifuge, par conséquent à un ralentissement de la rotation du globe. Laissons à d'autres le soin de rechercher les causes astronomiques, cosmiques ou telluriques qui pourraient expliquer un tel ralentissement, et revenons à notre Léman.

VI. **Le sol du lac.**

Dans les paragraphes précédents, nous avons étudié le relief général du bassin, décrit soit sa forme soit ses accidents. Nous avons maintenant à considérer le sol lui-même, la couche rocheuse, arénacée ou marneuse qui constitue les parois et le plancher de ce bassin. Quelle est la nature de ce sol ? quelle est son origine ? quelles sont ses pro-

priétés et ses particularités? Pour répondre à ces questions, nous allons reprendre les deux grands facteurs qui, agissant dans le lac, président à la formation du sol, à ses modifications et à ses types divers. Nous traiterons successivement :

De l'érosion et du sol d'érosion.

De l'alluvion et du sol d'alluvion.

1. *Méthodes de dragage.*

Pour étudier le sol du lac et en recueillir des échantillons, on emploie la drague. Dans les conditions où nous opérons, dans des lacs peu étendus et peu profonds, et étant connue la nature du sol de consistance vaseuse, limoneuse ou fangeuse, j'ai pu simplifier beaucoup les appareils et me dispenser des grandes dragues compliquées et encombrantes des explorateurs de l'océan.

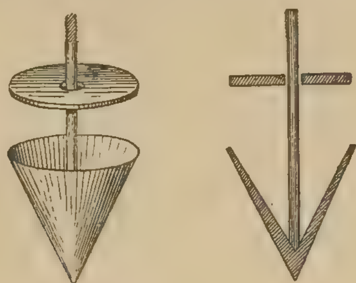


(Fig. 26.) Drague métallique, modèle Forel.

Ma drague métallique est un bidon de zinc, de section ovalaire, de deux litres de capacité (fig. 26). Le bord supérieur est tranchant, légèrement renversé en dehors; l'anse, en gros fil de fer, porte une boucle à laquelle on noue la cordelette d'attache. Cette corde, de 2 à 5^{m} de long, relie au plomb de sonde la drague et la tire en la couchant sur le sol lorsque le plomb est traîné au fond du lac. Cela s'obtient par une manœuvre très simple du bateau, qu'on fait avancer lorsque le fil de sonde est assez déroulé pour prendre une inclinaison convenable, environ 45° ; quelques coups de rame suffisent en général pour remplir la drague ; on peut aider à l'opération en tirant brusquement et avec quelques secousses sur la sonde. Le plomb de sonde doit être assez lourd, d'autant plus lourd que le fil de sonde est plus épais et plus rugueux, et que la profondeur où l'on drague est plus grande. Je me sers suivant les circonstances de poids variant de 2 à 8 kilogrammes. Quant à la sonde et au treuil, je les ai suffisamment décrits dans mon avant-propos, page 3.

Les ingénieurs hydrographes chargés du lever de la carte au 1 : 25 000e ont recueilli de nombreux échantillons du sol en employant le sondeur à coupe. C'est un cône creux en fer (fig. 27), largement ouvert, vissé par une tringle au boulet qui sert de plomb de sonde ; il s'enfonce dans le limon à l'arrivée de l'appareil au fond du lac et se remplit jus-

qu'au bord. Une rondelle en cuir épais glisse librement sur la tige d'attache de la coupe, et ferme celle-ci pendant la remontée. Ce sondeur a parfaitement fonctionné dans les sols argileux, marneux ou fangeux. Il semble moins heureux dans les sols sableux ; dans le ravin sous-lacustre du Rhône, il est plusieurs fois revenu vide. Son contenu a-t-il été lavé par les puissants courants qu'il a traversés ? c'est l'opinion de M. Hörnlimann. Le 29 avril 1886, à bord du bateau le *Sondeur*, je discutais cette question avec l'excellent ingénieur hydrographe suisse ; nous étions au large de Lutry et nous venions de faire un dragage avec le sondeur à coupe, sur la plaine centrale. Je fis traîner



(Fig. 27.) Sondeur à coupe du bureau topographique fédéral.

l'instrument rempli d'une vase argileuse pendant un quart d'heure, derrière le bateau qui marchait avec une vitesse de 1^{m} par seconde ; le contenu de la coupe ne fut aucunement lavé. Cette expérience prouve qu'un violent courant ne peut pas vider le sondeur à coupe, s'il est plein d'une argile plastique. Puisque l'instrument a échoué dans le ravin sous-lacustre du Rhône, il faut en conclure que le sol est de nature différente que celui de la plaine centrale, que c'est du sable qui entre mal dans la coupe, ou qui peut mieux y être lavé par les courants.

2. *De l'Erosion.*

Que faut-il entendre par *érosion lacustre?* — De même que les agents atmosphériques attaquent les roches à l'air libre, les démolissent et les dispersent, de même l'eau du lac érode les roches immergées ; elle attaque aussi la zone immédiatement superposée à l'eau, celle qui est temporairement immergée ou simplement mouillée par les vagues ; elle est aidée dans son action sur cette zone par l'effet dissociant et dissolvant des agents atmosphériques.

L'érosion a lieu par action chimique et par action mécanique. L'érosion chimique est peu efficace dans la plupart des cas; dans le Léman elle est très faible, et se réduit à une très lente dissolution des roches calcaires et magnésiennes; nous pouvons la négliger pour le moment.

Les actions érosives d'ordre physique et mécanique sont, en revanche, beaucoup plus énergiques. Nous pouvons citer entr'autres :

a L'imbibition qui modifie notablement la consistance de certaines roches; les argiles et marnes en particulier, deviennent plus molles, presque fluentes, quand elles sont mouillées.

b Les alternatives d'humidité et de sécheresse sur le rivage, peu au-dessus de la nappe des eaux, amènent rapidement une désagrégation de certaines espèces de roches. Tantôt mouillées par les vagues ou par la pluie, tantôt desséchées à l'air, tantôt envahies par les hautes eaux, tantôt à sec par les basses eaux, les roches du rivage se fissurent, se crevassent, se décomposent en fragments qui se dégagent progressivement de leur adhérence avec les fragments voisins. Quand les alternatives de gel et de dégel viennent y ajouter leur action énergique de désagrégation, les matériaux rocheux sont bientôt exfoliés et démolis.

c Le mouvement mécanique des vagues aide à la disjonction des fragments ainsi dissociés; le choc de la vague ébranle les parties déjà séparées par des fissures, les disloque, les enlève. Cette action a lieu aussi bien sous l'eau que sur l'eau, aussi bien sur les matériaux meubles, comme les sables et les galets, que sur les roches dissociées en fragments par d'autres agents; elle est limitée à la région où les vagues sont actives, c'est-à-dire sous l'eau jusqu'à quelques mètres de profondeur, au-dessus de l'eau dans les parties du rivage que les vagues peuvent battre.

d Outre l'ébranlement et la désagrégation par poussée mécanique, il y a encore l'action causée par le frottement du sable en suspension dans l'eau, quand celle-ci est agitée par les vagues et les courants. Cette action n'est pas très puissante sur les roches en place, car pour la mettre en jeu, il faut une combinaison assez peu fréquente de conditions favorables. Il faut, pour que cette action soit efficace, que la roche ne soit pas revêtue d'une couche protectrice trop épaisse de sables ou de graviers; il faut, d'autre part, qu'il y ait cependant dans le voisinage immédiat, une provision suffisante de sable qui, mis en suspension par le jeu des vagues, puisse user et limer la pierre; il faut

enfin que la roche à attaquer soit exposée au choc direct des vagues, qu'elle ne soit ni trop au-dessus ni trop au-dessous de la surface de l'eau, pour que les mouvements du lac puissent y déployer leur effet maximal. L'action de l'érosion est donc localisée en certains points assez restreints. En revanche, elle est fort efficace sur les galets et les sables dont les grains, roulés par les vagues, frottent les uns sur les autres, s'usent, s'émoussent et s'arrondissent. L'ensemble de ces actions que nous réunissons sous le nom général d'actions d'érosion, attaquent la rive et les murailles rocheuses du littoral, et tendent à les détruire en augmentant le domaine du lac aux dépens de la terre ferme.

3. *Du sol d'érosion.*

Là où l'érosion est dominante, elle empêche le dépôt des alluvions ; elle met à nu les murailles du lac, et même les attaque ; dans ces régions, le sol du lac mérite le nom de *sol d'érosion*. Je le constate sous des formes diverses :

1° Dans les parois verticales des rochers qui constituent en certaines places le talus du lac, à quelque profondeur qu'on les rencontre. Ces parois peuvent être des calcaires (Chillon, le Fénalet), des poudingues (Lavaux) ou des mollasses. L'inclinaison de la paroi de rochers est telle que l'alluvion du lac ne peut y adhérer, et le roc restant à nu au contact de l'eau, subit très lentement une action de dissolution chimique. Pour les parois de rochers qui s'approchent de la surface de l'eau, l'action mécanique des vagues intervenant, l'érosion est sensiblement plus énergique.

2° Dans les côtes soumises à l'érosion, il se forme par l'action du lac une falaise qui domine la grève ; cette falaise est creusée dans les couches géologiques anciennes qui sont ainsi successivement attaquées. En même temps la grève est travaillée par l'action mécanique des vagues et par l'action chimique de l'eau, de manière à ce que, s'émiettant en particules de plus en plus fines, elle est petit à petit entraînée dans le domaine du lac. La côte, dans ces régions, se creuse toujours plus, et la beine envahit toujours davantage le domaine de la terre ferme (beine d'érosion).

La côte, ainsi érodée, peut présenter sur notre lac les natures suivantes :

a Roche solide, difficilement attaquable ; calcaire, poudingue ou mollasse. Le choc des galets charriés par les vagues arrondit ces surfaces rocheuses, et leur donne des formes *moutonnées*, analogues au premier aspect aux roches moutonnées des assises polies par les glaciers. Un peu d'attention permet du reste de distinguer sûrement ces deux modes d'action. Exemples, côte de Préverenges, Fraidaigues, Chillon, etc.

b Quelquefois la roche est formée de couches inégalement résistantes, et l'on voit le banc supérieur peu attaqué, tandis que la couche qui le supporte est érodée par ses bords, dissoute ou dissociée. La roche supérieure, manquant alors d'appui, s'affaisse par bandes successives qui se fractionnent en quartiers de dimensions irrégulières, ces morceaux restant plus ou moins dans leur position relative, aussi longtemps que le choc des vagues ne les disperse pas. J'en connais un bon exemple au-dessous de Préverenges, où la roche dure est un calcaire puant de la mollasse, et la roche tendre qui le supporte une marne. J'en pourrais citer d'autres encore en les cherchant au bord du lac de Neuchâtel.

c Lorsque le sol primitif était une moraine glaciaire, les parties impalpables et mobiles, argiles et sables sont emportées par les vagues ; les cailloux et les blocs restent sur place en recouvrant le sol irrégulièrement, selon le hasard de leur position dans la moraine. Blocs et cailloux restent ainsi disséminés au milieu de la beine. Le plus bel exemple que je puisse citer est la magnifique moraine qui s'étend de la tuilerie de Préverenges à la pointe de la Venoge ; le nombre et la grosseur des blocs y sont tout à fait remarquables. On peut encore citer une belle moraine visible dans l'eau près de Céligny, au sud du débarcadère des bateaux à vapeur, celle d'Yvoire, etc. C'est ce que j'ai appelé les *moraines littorales*.

d Enfin, le sol primitif était marneux, argileux ou sableux ; sous l'action de l'érosion tout est enlevé, et il ne reste rien sur place.

4. *Pavés de la grève et ténevières.* [1]

Etudions un point de détail de ce phénomène d'érosion, qui nous donnera la clef de quelques faits jusqu'à présent mal expliqués. Nous

[1] *F.-A. Forel,* les ténevières des lacs suisses. Arch. de Genève. I. 430, 1879.

avons dit plus haut que la grève, lorsqu'elle est caillouteuse, est en général formée par un revêtement de galets, une seule couche, un pavé superficiel recouvrant un sous-sol sableux ou argileux. Voici comment j'explique la formation de ces pavés.

Lorsqu'une côte consiste en ce terrain complexe et peu homogène qu'on appelle boue glaciaire, ou argile glaciaire, et dont l'origine doit se chercher dans la moraine profonde des grands glaciers alpins de l'époque diluvienne, lorsque ce mélange de sables, de glaises, de cailloux et de blocs est attaqué par l'érosion du lac, l'action de sape des vagues fait successivement ébouler ces divers matériaux au pied de la falaise. Les parties les plus fines, les argiles et les sables, sont emportées par la vague et entraînées dans le lac ; il ne reste sur place que les galets, cailloux et blocs d'un certain volume. Les cailloux dont la grosseur dépasse le volume du poing ne sont pas facilement déplacés par les vagues du Léman. Tant qu'ils sont peu nombreux, ils n'ont aucun effet protecteur sur le sol qui les porte, et leur base étant successivement déchaussée par les vagues, ils s'éboulent toujours plus bas, sans arrêter en rien l'érosion.

Mais dans ce mouvement de descente, ils rencontrent d'autres cailloux et blocs enchassés au-dessous d'eux dans la boue glaciaire ; et ceux-ci suivant la même fortune, le nombre de ces cailloux s'accroît jusqu'à ce qu'ils arrivent à se toucher bout à bout, et à former ce que j'appelle un *pavé*. Alors ils protègent les couches sous-jacentes contre l'action des vagues, et l'érosion est presque absolument arrêtée.

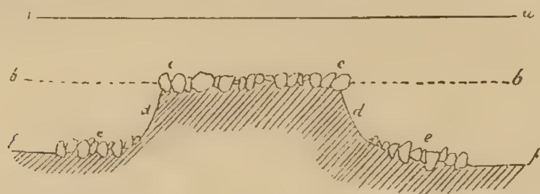
Nous pouvons comparer cette action à ce qui se passe sur un glacier. Un bloc isolé protège la glace sur laquelle il repose, et il se forme bientôt une *table du glacier*, laquelle s'éboule lorsque sa base est trop amincie par la fusion, et ainsi de suite. Quelques blocs isolés ne retardent en rien la valeur de l'ablation à la surface du glacier ; mais si ces blocs se touchent tous et constituent sur le glacier une moraine médiane, ils forment un pavé protecteur qui entrave l'action de l'ablation ; la moraine reste supportée par une masse de glace qui, étant moins que le reste attaquée par l'ablation, s'élève au milieu du glacier.

Ces pavés protecteurs, établis naturellement ou artificiellement sur la grève à la base d'une falaise, sont à mon avis la meilleure défense que l'on puisse opposer aux vagues, pour autant du moins que de très hautes eaux n'amènent pas les vagues jusque dans les couches mêmes

de la falaise. J'ai vu des administrations communales commettre l'imprudence de laisser enlever les pavés protecteurs au pied de certaines falaises des bords du lac, et, après ce crime de lèse-nature, j'ai constaté que l'érosion gagnait considérablement sur la terre ferme.

Cependant le pavé protecteur n'est pas à l'abri de toute attaque des vagues. Il n'arrête l'érosion que dans les parties qu'il recouvre; ses bords ne sont pas protégés. En effet, autour de l'un de ces pavés, la grève est érodée; au devant, sur les côtés, elle est creusée, et la partie protégée par le pavé reste sur un monticule d'où elle domine les parties plus basses qui l'entourent. Dès ce moment, il est lui-même attaqué; il se produit sur son pourtour une petite falaise d'éboulement, et ses bords s'effondrant par couches successives, le pavé est dissocié, le monticule érodé.

Mais le pavé se reformera de lui-même à un niveau inférieur; les pierres qui le constituaient ne sont pas disséminées; elles restent sur place, elles sont en nombre suffisant pour se toucher toutes bout à bout; le pavé se rétablira donc au niveau, provisoire ou définitif, acquis par le sol autour de lui. Une fois le pavé reformé, l'érosion sera temporairement arrêtée dans la partie qu'il protège. La fig. 28



(Fig. 28.) Pavé d'une ténevière, en voie de reconstitution à un niveau inférieur.

représente le procès d'affaissement progressif d'un pavé protecteur dans la beine. La ligne *aa* désigne la nappe des eaux, la ligne ponctuée *bb* l'ancien niveau du sol, *cc* le pavé non encore disloqué, *dd* les petites falaises sous-aquatiques qui attaquent latéralement le pavé et le désagrègent, *ee* le pavé reconstitué à son niveau inférieur, *ff* la nouvelle surface du sol. Ce procès se répètera jusqu'à ce que parties protégées et parties non protégées soient descendues à un niveau tel, que les vagues n'agissent plus sur le sol. Au milieu de la beine d'érosion, l'on trouvera donc des monticules recouverts d'un pavé continu, souvenirs de l'ancien rivage *(Steinberg)*.

Je connais en plus d'une localité près de Morges, soit dans le golfe de la Poudrière, soit dans le golfe de Préverenges, des amas de pierres

formant au milieu de la beine des monticules allongés, parallèles à la rive, s'élevant de quelques décimètres au-dessus du sol vaseux ou sableux qui les entoure. Ces amas de pierres ne sont autre chose que les anciens pavés de la grève, descendus par suite de l'érosion jusqu'au niveau général de la beine. Ils sont des témoins de la position de la rive dans les temps anciens ; on ne les trouve que dans la beine d'érosion ; ils ne peuvent exister dans la beine d'alluvion.

J'appelle ces monticules de pierre des *ténerières naturelles* en leur appliquant le nom local du lac de Neuchâtel, donné par M. E. Desor aux monticules pierreux qui portent les ruines des palafittes. (1) Dans un paragraphe ultérieur, je décrirai la genèse des *ténevières artificielles* des palafittes, et je ferai la différenciation entre ces deux ordres de monticules.

5. *De l'alluvion.*

L'*alluvion* est l'action opposée à l'érosion. L'alluvion est le dépôt des matériaux solides enlevés au sol par l'érosion. Le phénomène peut se résumer dans les faits suivants :

Il y a alluvion chimique lorsque les matériaux dissous dans l'eau se précipitent sous forme cristalline ou sous forme amorphe et se déposent au fond de l'eau. Nous constaterons que ce mode d'alluvion, très actif dans d'autres eaux, est d'effet presque nul dans le lac Léman. C'est à peine si nous pouvons en trouver traces dans les dépôts tufeux des algues incrustantes, dans quelques rares localités du lac.

Il y a alluvion mécanique lorsque des corps en suspension dans l'eau se déposent sur le fond. Toutes choses égales d'ailleurs, plus le corps étranger est dense, plus il est volumineux, plus sa forme se rapproche de celle de la sphère, plus sa chute est rapide, et plus vite l'alluvion se dépose sur le fond. Par conséquent, les alluvions grossières sont localisées à une faible distance de leur point de départ, les alluvions impalpables peuvent être disséminées au loin.

Dans un lac comme le nôtre, les circonstances qui occasionnent l'alluvion sont en général :

a L'existence de poussières impalpables en suspension dans l'eau. Que ce soit l'eau trouble des affluents apportée dans le lac et diva-

(1) *E. Desor.* Les palafittes, p. 10, Paris 1865.

guant loin de leur embouchure, que ce soit l'eau du littoral salie par les mouvements des vagues qui soulèvent la vase de la grève, qu'il s'agisse de poussières minérales, qu'il s'agisse de débris de la vie organique, toutes les fois que des particules solides plus lourdes que l'eau sont en suspension dans celle-ci, sitôt que les mouvements qui les soulevaient cessent d'agir, elles tombent, et finissent tôt ou tard par se déposer sur le sol. L'*alluvion impalpable* étant formée de particules extrêmement fines, les poussières organiques qui peuvent en être rapprochées ayant une densité de très peu supérieure à celle de l'eau, les unes et les autres mettent un temps considérable pour se précipiter sur le fond. Elles peuvent être transportées à de grandes distances de leur point d'origine.

b L'*alluvion grossière* des affluents, les sables, les graviers, les galets qu'un fleuve, une rivière, un torrent transporte dans ses eaux ou fait rouler sur son lit, constituent l'alluvion *fluvio-lacustre*. Sitôt arrivées dans le lac, les eaux de l'affluent cessent d'être torrentielles ; elles ne tiennent plus en suspension les sables fins; elles ne peuvent plus rouler les galets ; les premiers tombent sur le sol, les seconds restent immobiles. Plus ils sont gros et denses, plus près de l'embouchure se déposent-ils ; les galets reposent sur la grève, les graviers descendent quelques mètres plus bas ; les sables seuls, quant l'affluent prolonge son courant dans le lac, peuvent être transportés à quelque distance. Il n'y a de transport un peu éloigné que pour les sables formés de lamelles aplaties, comme les cristaux de mica, qui restent assez longtemps en suspension dans leur descente oscillante (¹) à travers l'eau.

c Les vagues s'emparent sur le littoral des galets et des sables désagrégés par l'érosion lacustre ou amenés par l'alluvion torrentielle;

(¹) Les lamelles aplaties comme celles du mica, en suspension dans un liquide, s'orientent bientôt en une position horizontale et tombent lentement en décrivant des mouvements alternatifs d'oscillation latérale. Il en résulte qu'une eau micacée, comme celle des torrents alpins venant de terrains riches en mica, prend, sitôt qu'elle est en repos, une teinte grise uniforme par la réflexion de la même région du firmament sur les paillettes semblablement orientées. Si une cause disturbante agite l'eau, un remous du courant, une vague du vent, un coup porté dans l'eau par la chute d'une pierre, etc., l'horizontalité des lamelles est troublée par des mouvements d'ensemble ; elles s'inclinent simultanément et par groupes dans un même sens, en réfléchissant la lumière incidente suivant des conditions nouvelles ; cela donne à l'eau des teintes moirées très élégantes qui dessinent admirablement les mouvements intestins des ondes liquides. Je recommande l'usage d'une telle eau micacée pour les études sur l'oscillation de l'eau et sur les courants.

elles les roulent, les charrient avec des allures fort différentes suivant les localités et les circonstances. Tantôt elles les accumulent sur la grève, et en font des amoncellements, tantôt elles les promènent en les faisant cheminer sur la grève, de telle sorte qu'après une tempête on trouve, à grande distance, les matériaux qui la veille étaient entassés devant une fabrique (débris de tuiles par exemple), ou à l'embouchure d'une rivière; tantôt enfin elles les enlèvent pour les entraîner dans la direction du plein lac, tellement que la plage, hier encore ensablée, est aujourd'hui dégarnie de sable et hérissée de galets. Ces différences d'action viennent essentiellement de différences dans la direction des vagues. — Quoi qu'il en soit, nous devons reconnaître aux vagues une puissante faculté de transport et de disposition de l'alluvion lacustre : elles sont un des agents modificateurs les plus efficaces du relief et de la structure du littoral.

L'alluvion est composée des matériaux solides qui se séparent par précipitation chimique ou mécanique de l'eau du lac, et se déposent sur le sol, que ce soit sur le fond, que ce soit sur les bords. Les origines de ces matériaux peuvent être fort différentes ; nous pouvons les distinguer en :

1° Corps qui tombent directement dans le lac, à savoir :

a L'eau météorique. L'eau de pluie, la neige, la grêle sont relativement pures ; elles contiennent en dissolution quelques substances ammoniacales, et en suspension quelques poussières collectées pendant la chute à travers l'air. C'est ainsi que, d'après les études de M. A. Lévy, à l'observatoire de Montsouris près Paris pendant l'année 1877-78, l'eau de pluie contenait en moyenne par litre : [1]

Ammoniaque	2.3 mg.
Acide azotique	0.9 »
Matières organiques révélables par le permanganate de potassium [2]	49.0 »

Les substances azotées, dissoutes dans les eaux atmosphériques, restent dissoutes dans le lac ; elles ne participent donc en rien à la

[1] Annuaire de l'observatoire de Montsouris pour l'année 1879, p. 402 sq.

[2] Ces matières organiques nécessitaient pour leur oxydation par le permanganate de potasse un poids d'oxygène de 2.5 mg. C'étaient probablement, en grande partie, des poussières atmosphériques.

formation de l'alluvion, ou du moins n'y prennent une part que lorsqu'elles ont été assimilées par des organismes, quand elles sont entrées sous forme solide dans le corps des animaux ou des plantes.

b Les poussières météoriques, assez abondantes d'après certains auteurs, Tissandier, Yung. ([1]) Je n'ai pas su rencontrer ces poussières dans le produit de mes dragages profonds.

c Les aérolithes ou pierres météoriques qui sont fort rares.

d Les poussières atmosphériques soulevées par les vents et entraînées jusque sur le lac : ces poussières peuvent être de nature minérale ou organique (fleur du lac, voyez plus bas).

e Les animaux qui viennent se noyer dans le lac.

f Les œufs des animaux qui viennent pondre dans le lac.

g Les excréments des oiseaux et chauve-souris qui viennent voler sur le lac ou nager sur les eaux.

2° Les corps en dissolution ou en suspension charriés par les affluents du lac. Ce peuvent être :

a De l'eau tenant en dissolution certains matériaux organiques et minéraux.

b Des matériaux inorganiques, sous la forme de poussières impalpables en suspension dans l'eau, ou bien de sables, de graviers et de gâlets, qui reposent sur le lit de la rivière, mais sont déplacés en descendant le fil de l'eau par l'action mécanique du courant. Les matières terreuses non dissoutes par l'eau sont entraînées sous forme de poussières impalpables.

c Des débris organiques, terrestres ou fluviatiles, cadavres d'animaux, plantes ou débris de ces organismes.

d Des plantes, et des animaux vivants entraînés par le courant jusqu'au lac.

3° Les matériaux arrachés à la grève par le choc des vagues.

4° Les débris jetés par l'homme. Je citerai entr'autres les scories de coke provenant des fournaises des chaudières des bateaux à vapeur.

5° A ces matériaux d'origine étrangère au lac se joignent, pour former l'alluvion, les débris des animaux et des végétaux ayant vécu dans le lac.

Une partie de ces matériaux ne reste pas dans le lac, et en sort

([1]) *E. Yung.* Etude sur les poussières cosmiques. Bull. S. V. S. N. XIV, 493, Lausanne 1871.

comme nous le verrons dans un paragraphe suivant. Une autre partie se précipite sur le fond et y forme l'alluvion.

Les matériaux de l'alluvion se divisent tout d'abord suivant leur densité, en matériaux plus légers que l'eau, qui flottent à la surface, et en matériaux plus lourds que l'eau, qui sombrent au fond.

1° Parmi les corps qui flottent à la surface, je citerai :

a En fait de matériaux inorganiques :

Les sables. Des grains de sables secs posés sur l'eau, dans le cas surtout où l'eau est recouverte d'une couche graisseuse, flottent retenus par des attractions capillaires, comme une aiguille d'acier qu'on place délicatement à la surface d'un baquet d'eau. Par un temps calme, j'ai vu parfois le sable être soulevé en plaques larges comme la main, ou plus, de l'épaisseur d'une seule rangée de grains, ces plaques flotter à la surface de l'eau, et être entraînées par des courants (1).

Les cendres de coke des bateaux à vapeur, les scories bulleuses, analogues à la pierre ponce que le *Challenger* a constatée en si grande abondance dans les dragages de l'Océan Pacifique, flottent plus ou moins longtemps et se dispersent à la surface du lac ; une partie est jetée à la côte, l'autre partie sombre dans les grands fonds lorsque les vacuoles de la substance poreuse sont, l'une après l'autre, envahies par l'eau.

b En fait de matériaux organiques, la plupart des débris végétaux et une partie des débris animaux. La plupart des bois et des débris végétaux sont plus légers que l'eau et flottent à la surface, pour un temps du moins. Mais les pores et cellules de la substance ligneuse ne tardent pas à se remplir d'eau, la densité augmente, et bois, feuilles et racines finissent au bout d'un temps plus ou moins long par couler au fond de l'eau.

Les cadavres animaux sont, les uns plus lourds, les autres plus légers que l'eau, et suivant leur densité ils flottent ou s'enfoncent. Pour ceux qui sont descendus à une faible profondeur, la putréfaction tend bientôt à les faire remonter à la surface. Je traiterai cette question dans un paragraphe spécial.

Tous ces corps plus légers que l'eau sont promenés par les vents et les courants à la surface du lac, jusqu'à ce qu'ils s'enfoncent, qu'ils se dissocient ou qu'ils soient jetés à la côte. Entassés par les

(1) Voir aussi : *G. Ritter*. Bull. S. S. N. Neuchâtel. XII, 119, 1880.

vagues, ils forment ces amas de débris qui salissent par places la plupart de nos côtes.

Quelques-uns de ces matériaux légers ont à peu près la densité de l'eau ; lorsque leur densité est intermédiaire à celle de l'eau de la surface plus légère et à celle de l'eau du fond plus lourde, ces corps flottent entre deux eaux. Ce fait ne peut avoir lieu qu'au printemps et en été, lorsque l'eau est stratifiée en couches de température et de densité différentes. On voit parfois des bois, des roseaux flotter entre deux eaux, à un ou deux mètres de profondeur, sans s'élever, sans descendre. Nous utiliserons ce fait pour l'explication de certaines variations de la transparence de l'eau.

2° Les matériaux plus lourds que l'eau sont essentiellement les corps inorganiques, exceptionnellement les corps organiques. Ils descendent au fond et forment l'alluvion. Cette alluvion tombe sur le fond suivant une loi bien simple : A volume égal les corps les plus denses, à densité égale les corps les plus volumineux, à densité et à volume égaux les corps les plus rapprochés de la forme sphérique tombent le plus vite dans l'eau.

Comme c'est surtout par le transport des rivières que les matériaux de l'alluvion sont amenés au lac, ils sont distribués autour de l'embouchure des cours d'eau en rayonnant et en divergeant. Les galets sont amenés par le courant du torrent jusqu'au lac, mais sitôt qu'ils arrivent dans une eau calme, ils s'arrêtent à l'embouchure même de la rivière ; ils sont repris ensuite par les vagues du lac et disséminés sur la grève. Le gravier et le sable sont entrainés un peu plus en avant, et le violent courant que les eaux d'un torrent débordé tracent dans le lac peut charrier encore assez loin ces matériaux solides, qui tombent les uns après les autres sur les flancs sous-lacustres du talus d'alluvion.

Quant à la poussière impalpable et aux matériaux terreux qui restent en suspension dans l'eau, ils peuvent être transportés fort loin dans le lac ; les eaux ainsi salies mettent très longtemps à se clarifier ; elles peuvent avant de déposer leur limon, faire un très long trajet, soit à la surface du lac lorsqu'elles sont plus chaudes que lui (au printemps), soit entre deux eaux ou en rampant sur le talus lorsqu'elles sont plus froides que la surface. Petit à petit cependant, elles laissent tomber la poussière impalpable qu'elles renferment, et l'alluvion descend lentement jusque dans les plus grands fonds du lac.

Pour apprécier la vitesse avec laquelle se fait la précipitation de l'al-

luvion, j'ai institué l'expérience suivante, mars 1874. J'ai un photomètre de Rumford, consistant en un vase de 1^{m} de longueur sur 10^{cm} de largeur et 10^{cm} de profondeur. Les parois latérales et le fond sont en zinc verni en noir ; les deux parois extrêmes sont en glaces de verre blanc. Un stylet est placé verticalement en dehors du vase, à l'une des extrémités, et son ombre vient se former sur un écran de papier huilé. Je compare les ombres de ce stylet produites par deux bougies de même intensité et dont les rayons traversent l'un A le bassin plein d'eau, l'autre B l'air de la chambre ; en plaçant les bougies à une distance convenable j'arrive à égaliser l'intensité des ombres. J'apporte à ces comparaisons une correction nécessaire, représentant la quantité de lumière absorbée par le passage à travers les glaces du bassin vide d'eau. La distance entre la bougie A et le stylet est toujours la même 1.16^{m}, la distance d du stylet de la bougie B est variable, je la mesure directement. Avec de l'eau pure du lac, l'absorption à travers un mètre d'eau est très faible, et la distance à laquelle je dois placer la bougie mobile B pour obtenir une ombre égale à celle de la bougie fixe dont le rayon a traversé l'eau varie de 1.2 à 1.3^{m}.

Cela établi, je prends, le 26 mars, à midi, de l'eau pure du lac et je délaie, dans les 10 litres d'eau qui remplissent le bassin du photomètre, un morceau de 8 grammes de limon du lac desséché, dragué à 50^{m} de fond devant Morges. Je fais des essais photométriques pour déterminer le moment auquel le dépôt du limon sera achevé.

26 mars,	midi,	opacité	absolue	
27 —	7^{h} s.	—	—	
— —	10^{h} s.	—	—	; cependant sur une épaisseur de 1^{cm} à partir de la surface je commence à apercevoir la lumière de la bougie, rouge comme un soleil couchant.
28 —	7^{h} s.	lumière rouge		$d = 11.5^{m}$
29 —	9^{h} s.	—		9.5
30 —	7^{h} s.	—		7.3
31 —	7^{h} s.	—		6.0
1er avril,	8^{h} s.	—		5.15

Je n'ai pas poursuivi plus loin cette expérience, mais les résultats obtenus au 6e jour montrent la lenteur prodigieuse du dépôt de l'alluvion. Combien de temps aurait-il fallu pour ramener la trans-

parence de l'eau à un degré tel que *d* fût égal à 1.2 ou 1.3^{m}?

Une autre expérience montrera encore le temps énorme que dure la précipitation des poussières impalpables. Le 20 avril 1876 je place dans deux flacons de verre transparent de l'eau trouble provenant d'un dragage fait devant Morges par 45^{m} de fond; le 24 avril à la même heure, soit après quatre jours entiers, l'eau est clarifiée dans l'un des flacons sur une épaisseur de 6.5^{cm}, dans l'autre sur une épaisseur de 9^{cm}. L'eau trouble forme au fond des vases un nuage parfaitement bien limité; on dirait un précipité de gélatine.

Ces expériences montrent la lenteur prodigieuse avec laquelle l'alluvion impalpable descend dans l'eau. On en déduira la notion que cette alluvion impalpable peut être transportée dans le lac à de très grandes distances avant que, dans sa chute, elle arrive sur le sol.

Je diviserai l'alluvion qui se dépose dans le lac en deux types différents par leur origine: suivant que c'est de l'alluvion fluviatile (1) apportée par les affluents ou de l'alluvion lacustre provenant du lac lui-même. Ces deux types se subdivisent eux-mêmes d'après la grosseur ou plutôt la masse des matériaux; quand c'est de l'alluvion grossière elle se dépose sur le littoral et ne s'avance dans le lac qu'en s'éboulant en talus; quand c'est de l'alluvion impalpable (ou peu dense) elle est charriée au loin et se dépose à de grandes distances jusque sur le plafond du lac. Nous avons ainsi quatre formes d'alluvion.

I. *Alluvion lacustre impalpable* composée de poussières organiques, débris de la vie animale et végétale dans le lac, de poussières organiques apportées par les affluents, de poussières inorganiques arrachées à la rive par les mouvements des vagues, de poussières inorganiques apportées par les affluents et mélangées avec l'eau du lac. Cette alluvion lacustre, assez légère pour rester fort longtemps en suspension dans l'eau, est charriée au loin par les courants et se dépose partout dans le lac, sur le littoral, sur les talus et sur le plafond du lac. Celle qui s'arrête sur le littoral est reprise par les vagues, et son dépôt n'est définitif que lorsqu'il a lieu dans une couche assez profonde pour que les vagues n'y agissent plus. L'alluvion lacustre impalpable est de

(1) C'est ce que j'ai désigné plus haut, page 102, sous le nom plus compliqué d'alluvion *fluvio-lacustre*. Comme il s'agit ici, sans aucun doute, d'alluvions déposées dans le lac, et qu'il ne peut y avoir confusion, je crois pouvoir abréger et l'appeler simplement alluvion *fluviatile*.

dépôt très général sur toute l'étendue du lac ; elle se mêle à toutes les autres formes d'alluvion.

II. *Alluvion fluviatile impalpable.* Quand un affluent est en crue, ses eaux sont alourdies par une telle abondance d'alluvion minérale impalpable qu'elles augmentent assez de densité pour ne plus s'étaler à la surface du lac, et pour descendre dans les grands fonds en suivant la ligne de plus grande pente du cône torrentiel immergé. Elles déposent alors leur alluvion sur le plafond du lac et tendent à le combler en le transformant en une plaine horizontale.

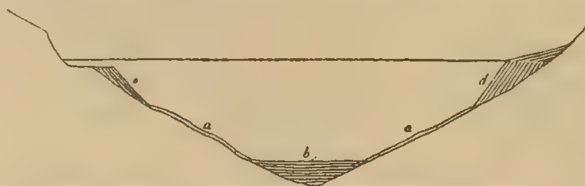
J'insisterai sur cette caractéristique de l'alluvion fluviatile impalpable, qui me paraît fort bien déterminée, mais demande à être précisée. Elle est formée par les poussières minérales en suspension dans l'eau des affluents, mais celles-ci ne produisent pas toujours des couches distinctes d'alluvion dans le lac. Quand les rivières sont à l'étiage et charrient peu, quand leur température est égale ou supérieure à celle des eaux de surface du lac, quand, à l'embouchure d'un torrent débordé, les vagues du lac mélangent les eaux fluviatiles avec les eaux du lac, dans une foule de circonstances, les poussières minérales provenant des affluents peuvent être mises en suspension dans l'eau du lac, être promenées avec elle par les vagues et les courants ; dans ce cas elles se confondent avec l'alluvion lacustre et se déposent avec elle. Il n'y a dépôt d'alluvion fluviatile impalpable, fournissant une couche spéciale dans le sol, que lorsque les eaux torrentielles forment dans le lac une masse distincte, de grande densité, qui s'écoule dans les grands fonds et va s'y accumuler sans se disperser dans l'étendue indéfinie du lac. Ce cas est représenté normalement par les eaux des rivières glaciaires pendant l'été, accidentellement par les torrents de la plaine lorsqu'ils sont débordés. Nous développerons cette question intéressante quand nous traiterons du ravin sous-lacustre du Rhône, dans un chapitre subséquent. Je citerai comme exemples de couches constituées essentiellement par l'alluvion fluviatile impalpable : la plaine centrale du Léman formée par l'alluvion impalpable du Rhône et celle de tous les affluents du Grand-lac ; le fond des cuvettes du Petit-lac formé de la même manière par les affluents qui y aboutissent.

III. *Alluvion lacustre grossière*, formée des sables arrachés à la grève par les vagues et emportés en avant par le courant de retour profond. Exemple : formation de la beine et du mont. A mesure que le talus d'éboulement du mont avance dans le lac, il efface sous sa décli-

vité régulière toutes les inégalités primitives des terrasses et accidents du talus général du lac.

IV. *Alluvion fluviatile grossière*, graviers et galets apportés par les affluents et versés dans le lac à leur embouchure ; elle forme les cônes torrentiels immergés dans le lac. Exemples : cônes de la Dranse, de la Veveyse, etc.

Ainsi, par leur nature, par leur origine aussi bien que par le lieu de leur dépôt, les alluvions d'un lac se divisent très naturellement en quatre formes dont je représenterai la situation par un schéma (fig. 29).



(Fig. 29.) Schéma du dépôt des quatre types d'alluvion dans le lac.

a a sera l'alluvion lacustre impalpable qui se dépose sur toute l'étendue du lac.

b l'alluvion fluviatile impalpable localisée dans la plaine centrale.

c l'alluvion lacustre grossière qui forme la beine devant les côtes d'érosion.

d l'alluvion fluviatile grossière qui forme les cônes torrentiels immergés et émergés aux embouchures des affluents.

Cette classification naturelle me semble parfaitement valable. Le relief primitif du lac n'est pas sensiblement altéré dans toute l'étendue où se dépose seulement l'alluvion lacustre impalpable ; il est au contraire méconnaissable sous les couches plus épaisses de l'alluvion fluviatile impalpable qui sont horizontales dans la plaine centrale du lac, et sous les couches des alluvions grossières, soit lacustres soit fluviatiles, qui sont fortement inclinées sur les talus d'éboulement du mont, et des cônes immergés des deltas torrentiels.

En éclairant par ces notions sur les alluvions fluvio-lacustres et lacustres la description générale que nous avons donnée du bassin du lac, nous en tirerons des conclusions intéressantes.

1° Le bassin du Léman représente une profonde vallée actuellement remplie d'eau, comblée par places par les alluvions fluviatiles grossières et impalpables et par les alluvions lacustres grossières, mais qui, sur de

grandes étendues, là où l'alluvion lacustre impalpable existe seule, laisse voir le relief primitif du sol.

2° les parties où domine l'alluvion lacustre grossière sont :

a Les régions littorales des côtes d'érosion, là où existent la beine et le mont.

b Les talus d'éboulement sur les replats des terrasses, là où le talus rocheux montre des inégalités de pentes (talus latéraux du Haut-lac).

3° Les parties où domine l'alluvion fluviatile grossière sont les cônes torrentiels immergés des divers affluents. Le plus important est le cône du Rhône qui remplit de son alluvion tout le plafond du Haut-lac et se prolonge jusqu'à la plaine centrale.

4° Les parties où domine l'alluvion fluviatile impalpable sont la plaine centrale du Grand-lac et le fond des fosses ou cuvettes du Petit-lac.

5° En dehors de ces parties qui sont constituées par une couche plus ou moins épaisse d'alluvion et où le relief originaire des murailles du lac est absolument masqué, le reste du lac n'est revêtu que par une couche uniforme d'alluvion lacustre impalpable. Nous n'en connaissons pas l'épaisseur, mais je présume qu'elle n'est pas très forte ; car, malgré un dépôt continu depuis que le Léman est un lac, malgré son accumulation par les courants dans les dépressions, elle n'est pas arrivée à recouvrir assez les inégalités primitives du sol jusqu'à les dissimuler entièrement. Nous retrouvons les indices évidents de ces inégalités sur la carte du lac ; je citerai comme rentrant dans cette catégorie les parties suivantes :

a Les talus latéraux du Haut-lac, entre les cônes torrentiels des affluents ; on y reconnaît des parois rocheuses avec des terrasses irrégulières, des éperons saillants, des replats, des monticules sous-lacustres, etc.

b Les talus latéraux de la région centrale et occidentale du Grand-lac, avec la rampe occidentale du plafond, de même en dehors des cônes des affluents, et en avant de la beine et du mont. On y reconnaît une grande et large vallée, aux talus peu inclinés et quelque peu irrégularisés, présentant dans son plafond un monticule médian, reste probable d'une île entourée par les deux bras du fleuve qui coulait autrefois dans cette vallée.

c Le Petit-lac dans son ensemble, à l'exception de la beine littorale, des cônes torrentiels et du fond des cuvettes.

Si je ne fais pas erreur, nous retrouvons donc en maint endroit sur la carte hydrographique les accidents primitifs du sol, avant qu'il ait été envahi par les eaux, légèrement émoussés et effacés par le dépôt général de l'alluvion lacustre impalpable.

5. *Du sol d'alluvion.*

L'alluvion que nous avons étudiée dans le paragraphe précédent forme le sol normal du lac et sauf dans les localités très restreintes où apparaît le sol d'érosion, elle recouvre tous les anciens terrains dans lesquels le bassin du lac est creusé. Cette alluvion se dépose sous trois formes :

a De gros galets ou cailloux, aux embouchures des torrents et sur la grève.

b Du sable plus ou moins grossier, sur la beine.

c Du limon, dans les grandes profondeurs.

Reprenons ces faits.

Galets. Les galets ne pénètrent que tout à fait accidentellement dans la région profonde du lac, en avant du littoral. Ils s'arrêtent tous sur la grève même, et là, saisis par les flots, ils sont promenés le long de la côte par le jeu des vagues. En effet celles-ci, en frappant la grève, ont le plus souvent une direction plus ou moins oblique, et en soulevant les galets elles les font rouler légèrement dans le sens de cette obliquité ; le flot de retour saisit les pierres et les fait redescendre suivant la ligne de plus grande pente ; une nouvelle vague survient qui les fait derechef un peu progresser, et ainsi de suite. Il en résulte que, dans ces promenades de va-et-vient, le galet est définitivement chassé le long de la grève, dans le sens où souffle le vent.

Dans quelques circonstances, l'on peut rencontrer des galets à une assez grande profondeur, bien au-dessous de la limite d'action des vagues, et bien loin du point où le courant de l'embouchure du torrent les avait directement déposés ; c'est lorsque le talus est très incliné, quand il n'y a pas de beine au-devant de lui : s'il se produit des éboulements sur les flancs de cette pente d'équilibre instable, les couches littorales, même celles qui appartiennent à la grève, sont entraînées par effondrement dans les grandes profondeurs. Je citerai comme exemple des galets et cailloux assez nombreux, recueillis dans des

dragages à 30 et 40^{m} de fond, devant l'Eperon et devant la promenade de Derrière-l'Aile à Vevey, le 17 mai 1877 ; ou encore les graviers que M. le Dr H. Schardt a dragués en juillet 1891 au pied de l'éboulement du quai de Montreux, jusqu'à 100^{m} et plus de profondeur. (1)

Les galets proviennent, ou de la trituration des roches en place de la côte, ou de l'apport des affluents. Au point de vue de leur composition minéralogique, ils peuvent donc être de nature fort diverse. C'est en particulier le cas pour notre lac, où nous avons :

a Des galets, débris des roches secondaires des murailles du Haut-lac ; ces calcaires sont représentés de Villeneuve à Clarens et du Bouveret à Meillerie.

b Des galets, débris des roches tertiaires, dans tout le reste du lac. Les mollasses, marnes et argiles sont tellement tendres qu'elles sont bien vite usées et que leurs fragments persistent peu dans la collection des galets du lac ; les poudingues de La Vaux et les calcaires fétides de l'aquitanien résistent plus longtemps et sont assez abondants sur les côtes formées de ces roches.

c Des galets, débris des terrains glaciaires, argile glaciaire et moraines. Ce sont ces cailloux de transport glaciaire qui représentent, partout où l'alluvion torrentielle n'est pas dominante, la très grande majorité des galets du lac. Ils sont formés par les différentes roches de tout le bassin d'alimentation de l'ancien glacier du Rhône, par conséquent de toutes les vallées du Valais, du Chablais et des Alpes vaudoises, avec toute la diversité des roches cristallines, métamorphiques, sédimentaires ou remaniées de ces régions compliquées. Un pavé de galets du Léman est une collection très complète de toutes les espèces minérales de ce vaste bassin, de milliers de kilomètres de superficie, et de la plus grande diversité de structure pétrographique.

d La grève des deltas des affluents est au contraire recouverte par l'alluvion fluviatile grossière, et son caractère minéralogique est lié à la nature pétrographique du bassin d'alimentation de chaque rivière. Les galets du Rhône, (2) ceux de la Drance, (3) de la Veveyse, etc., ont des types fort divers et peuvent se reconnaître à première vue.

(1) Communication de M. Schardt *in litt:* 2 août 1891.

(2) Les galets du Rhône qui arrivent jusqu'au lac proviennent essentiellement des derniers affluents du fleuve, la Grande-eau, la Viège de Val d'Illiers, la Grionne, l'Avençon. L'alluvion grossière, charriée par les affluents du cours su-

Sables. Les sables, couche meuble de grains pierreux non agglutinés, se présentent dans le lac dans les circonstances suivantes :

A. Sur la grève, où ils sont déposés et ordonnés par les vagues ; la décantation mécanique, que les flots opèrent, distribue le sable en zones où les grains ont tous la même grosseur, ou plus exactement la même masse. Le sable de la grève est parfaitement lavé. Les grains du sable de la grève sont roulés, et leurs arêtes sont émoussées et arrondies ; mais ils ne présentent cependant pas la sphéricité presque parfaite des grains du sable des dunes. Dans les dunes de Coudrée (comme du reste dans les dunes d'Arcachon, dans celles de Cette, de Hollande, dans celles du Sahara), le vent, en promenant indéfiniment le sable et le faisant rouler sur lui-même, donne à ces particules pierreuses la forme de sphérules régulières. Il semblerait que le roulement par les vagues, qui est aussi indéfiniment répété, devrait amener au même résultat pour le sable de la grève. La différence d'intensité des actions réside probablement dans la densité des milieux où baignent les grains minéraux : dans l'air la différence de densité est énorme, comme 1 : 250, entre la particule pierreuse et l'air atmosphérique, les frottements ont un effet d'usure beaucoup plus puissant ; dans l'eau la différence de densité est beaucoup plus faible, comme 1 : 3, et les effets d'usure sont moins rapides et moins intenses.

Le sable de la grève, là du moins où un affluent n'apporte pas de l'alluvion essentiellement calcaire, est remarquable par sa richesse en grains siliceux ; la grande majorité est de la quartzite et du quartz. La moyenne de huit échantillons, récoltés sur la grève entre Ouchy, Morges et St-Prex m'a donné seulement 21 % pour la partie soluble dans l'acide chlorhydrique, tandis que la moyenne de l'alluvion impalpable du Léman est de 40 %. J'attribue cette pauvreté relative en grains calcaires à la moins grande dureté de cette espèce minérale ; elle est plus vite usée et se transforme plus rapidement en alluvion impalpable. Tous les sables du Léman ne sont cependant pas aussi exclusivement

périeur du Rhône, est déjà réduite à l'état de sable fin quand elle est amenée aux bouches du fleuve dans le lac.

(3) J'ai jusqu'à présent écrit Dranse comme la Dranse de Martigny. On me fait remarquer que aussi bien la carte sarde que la carte française écrivent Drance ; les anciennes cartes que j'ai pu étudier dans la riche exposition de géographie historique de Berne, août 1891, emploient, dans leur grande majorité, la même orthographe : je dois donc me corriger, et j'écrirai dorénavant Drance pour la rivière du Chablais et Dranse pour celle de Martigny.

siliceux. Un échantillon pris au port de Thonon, et représentant l'alluvion torrentielle de la Drance, remaniée par l'action des vagues, contenait 67 $^0/_0$ de matériaux solubles dans H Cl; un échantillon de sable des dunes de Coudrée, 51 $^0/_0$.

B. Dans la beine. Le sable enlevé à la grève par le courant de retour des vagues est entraîné en avant et forme les couches de la beine. Ces courants de retour n'ont pas une très grande intensité, aussi ne promènent-ils que des grains de petites dimensions; le sable de la beine est très fin et très régulier. Celui que j'ai dragué devant Morges présente un caractère intéressant : les grains sont arrondis et presque aussi sphéroïdaux que ceux du sable des dunes. Mais cette forme tient à ce que chacun des grains est entouré d'une très mince couche de ciment calcaire; si on la dissout par l'action d'un acide, il reste un résidu de grains fragmentés absolument semblables à ceux de la grève. Quelquefois ce revêtement calcaire est assez abondant pour souder ensemble quelques grains voisins; il y a là tendance évidente à la formation, dans le lac, d'un grès ou d'une mollasse à ciment calcaire.

Dans la beine, au-dessus des couches profondes du sous-sol, qui sont formées de roches en place dans la beine d'érosion, et de sable dans la beine d'alluvion, je reconnais une distribution générale assez constante des espèces de sol dans la couche superficielle :

1° Au pied de la grève, à l'endroit où finissent les galets, est une bande vaseuse où croissent les forêts des plantes aquatiques, *Potamogeton*, *Myriophyllum*, *Ceratophyllum*, etc.; j'entends par *vase*, un dépôt extrêmement fin, où les grains minéraux ne se sentent plus dans le frottement entre deux doigts. Elle contient encore une assez grande quantité de matières organiques. Sa consistance est moins plastique que celle de l'argile, qui est purement minérale.

2° Devant l'embouchure des égouts, dans les anses bien abritées contre le choc des vagues, cette vase peut présenter la consistance fangeuse. J'appelle *fange*, le dépôt vaseux qui, par une surabondance de matières organiques, devient fétide.

3° Plus en avant, jusqu'au bord du mont, est un sol sableux, stérile, contenant très peu d'animaux et de plantes. Quelques *Chara* ou *Nitella*.

4° Sur la beine, en plus d'une place, sont des dépôts d'une argile plastique très fine; j'en connais des exemples devant Morges, Ouchy, au banc du Travers. Il semble que la vase fine, quand elle a perdu ses matériaux organiques, se transforme en cette argile.

5° Sur les flancs du mont, sable et vase.

6° Au pied du mont, vase.

7° En avant du mont, le talus est recouvert par le limon de l'*alluvion lacustre.*

C. J'ai signalé (1) la présence de sable sur le monticule des digues du ravin sous-lacustre du Rhône. C'est du sable du Rhône mélangé d'un peu de vase.

Deux autres dragages ont donné, de même, du sable presque pur, provenant de la région profonde du lac. C'est dans le profil CLXXXXVIII, points 29 et 30, Delebecque, devant la Drance, à 2600 et 3000m de la rive, par 247 et 248m de fond. D'après l'analyse faite par M. P. Freundler, étudiant en sciences, dans le laboratoire de M. le professeur Duparc à Genève, il est formé pour un tiers de poudre très fine, pour deux tiers de sable. C'est en grande majorité du quartz blanc, un peu de calcaire, et des silicates colorés par le fer. Il peut se diviser en quatre grosseurs :

			Grosseur des éléments
Poudre très fine, représentant	1/3 faible	de la masse	0.048mm
Sable fin	— 1/3 fort	—	0.166mm
Sable grossier	— 1/4 —	—	0.256mm
Gros grains peu nombreux, pauvres en quartz			0.4 à 0.8mm

Limon des grands fonds. Toute la région profonde du lac a son sol formé par de l'alluvion impalpable, dans la grande généralité du lac l'alluvion lacustre, dans la plaine centrale du Grand-lac et au fond des cuvettes du Petit-lac l'alluvion fluviatile.

L'alluvion impalpable déposée dans le sol du lac est très uniforme et varie peu dans ses caractères. C'est, à la surface, une vase légère, grisâtre, d'une extrême finesse, très propre, sans autres corps étrangers que quelques grains de sable et les corps ou cadavres des organismes lacustres. Les grains minéraux qui la constituent ne dépassent pas un ou deux millièmes de millimètres de grosseur. Je l'étudierai :

Au point de vue physique. Elle est partout la même dans sa nature vaseuse de poussières impalpables ; à la surface, sa consistance est celle d'une crême épaisse ou du beurre.

Je n'ai à signaler de faciès particulier que sur le cône torrentiel du Rhône où des lamelles de mica, provenant des terrains cristallins du

(1) Pages 65 et 95.

Valais, lui donnent un aspect argenté tout particulier ; cette vase argentée s'étend fort loin ; je l'ai reconnue jusque sur un échantillon dragué au large de Rivaz, à 9^{km} des bouches du Rhône.

La vase contient accidentellement du sable en grains plus ou moins grossiers qui font contraste avec la finesse extrême des parties constituantes de l'alluvion. Ce sable peut avoir trois origines :

a) Ou bien il est apporté par les eaux fluviatiles et transporté assez loin dans le lac par le courant puissant de l'affluent. Nous avons vu que sur la digue du ravin sous-lacustre du Rhône un monticule semble être essentiellement formé de sable. Ce sable torrentiel va en diminuant de nombre et de calibre à mesure que l'on s'éloigne des bouches du Rhône, le seul point où j'en aie étudié la distribution ; à quelques kilomètres de distance, il disparaît entièrement. Sur un échantillon dragué à mi-lac entre St-Saphorin et Meillerie, à 7.5^{km} du Rhône, je n'ai pesé que 0.4^{gr} de ce sable sur 17^{gr} de vase soit seulement, 2 1/2 pour cent de la masse.

M. P. Freundler, étudiant en sciences à l'Université de Genève, a fait, dans le laboratoire de M. le professeur Duparc, l'analyse microscopique du sable trouvé dans quelques échantillons de boue, dragués par M. Delebecque sur le cône de la Drance ; la profondeur indique la distance relative de la côte. Voici la grosseur des grains de sable en millièmes de millimètres, μ.

	Minimum	Maximum	Moyenne
Devant la Drance 150 ^{m} de fond	13 μ	74 μ	19 μ
— 180 —	6	66	36
— 220 —	6	48	26
— 250 —	13	96	26
— 260 —	13	66	40

Il y a, dans l'irrégularité de cette répartition, quelque chose d'accidentel, dû au jeu inégal des courants.

b) Ou bien il est apporté par les vents qui soulèvent des tourbillons de poussière et la laissent tomber sur l'eau, en plein lac. J'attribue cette origine au sable que nous trouvons sur la plaine centrale, loin de toute embouchure d'affluents importants. Ainsi, dans un échantillon dragué sur le profil Ouchy-Evian, à mi-lac, au point de profondeur maximale de la plaine centrale, M. le professeur E. Chuard, de Lausanne, a trouvé un résidu sableux assez important. Après 39 lévigations, il a pesé :

Argile impalpable	95.7
Sable	4.3

Plus de 4 pour cent de sable dans une localité si éloignée des bouches du Rhône, 20km, et de la Drance, 10km, ne peut s'expliquer que par un transport par voie aérienne.

c) Ou bien il est apporté par les radeaux de sable flottant à la surface que j'ai décrits ci-dessus. [1] Mais je ne saurais attribuer à ceux-ci un bien long voyage sur le lac; la moindre vague les ferait couler à fond; ils ne peuvent expliquer la présence du sable dans le sol du lac qu'à une faible distance des côtes.

La vase des grands fonds contient accidentellement des cailloux; j'en traiterai dans un paragraphe spécial.

La couleur de la vase superficielle des grands fonds est assez différente dans les diverses régions du lac; dans le Haut-lac, devant Morges, elle est d'un gris ardoisé; dans le Petit-lac, et surtout sur la barre de Promenthoux, elle est d'un gris jaunâtre. La différence est bien évidente; elle est plus apparente dans les vases humides que dans les échantillons séchés.

L'alluvion du lac contient enfin de nombreux organismes, soit vivants soit morts, que j'aurai à décrire en détail dans une autre partie de ce livre. Je signalerai dès à présent, comme se trouvant normalement dans l'alluvion du lac, des squelettes siliceux de diatomées, des coquilles de mollusques, et surtout des carapaces d'entomostracés, cladocères, copépodes et ostracodes, provenant soit de la faune profonde, soit plutôt de la faune pélagique. Ces débris de crustacés sont si nombreux en certaines régions où ils sont accumulés par les courants du lac, — ils se comptent par milliers et dizaines de milliers dans un litre de limon — que la vase qui les renferme mériterait peut-être d'être caractérisée par un nom spécial, en analogie avec les boues de l'Océan, et d'être appelée vase ou *boue à entomostracés*. Quand cette vase a été tamisée, les carapaces d'entomostracés, légères, flottent longtemps entre deux eaux et forment un nuage opaque tout à fait particulier.

Dans quelques cas, la drague a ramené une couche assez épaisse pour que j'aie pu y reconnaître une stratification; j'y ai constaté généralement la coupe suivante:

(1) Page 105.

a La surface en contact avec l'eau est très égale; l'on n'y voit, en fait de saillies, que les corps organisés, à savoir les polypiers des bryozoaires, les tubes vaseux des larves et des annélides tubicoles, et les coquilles des mollusques gastéropodes. Cette surface est remarquable par le revêtement qu'elle présente, jusqu'à une profondeur de cent mètres environ, d'une couche continue d'organismes très inférieurs; nous la décrirons plus loin sous le nom de *feutre organique*.

b Une couche gris-jaunâtre, de consistance limoneuse ou vaseuse, de deux à quatre centimètres d'épaisseur; elle renferme les animaux limicoles vivants et les débris d'animaux morts.

c Une couche brun-noirâtre d'un demi-centimètre d'épaisseur.

d Une couche gris-bleuâtre dont je n'ai pu mesurer l'épaisseur et que je suppose s'étendre jusqu'au sol primitif du lac, et former toute la masse de l'alluvion lacustre moderne. Elle est de nature argileuse et ne contient plus d'animaux vivants. Chose curieuse, les débris fossiles (coquilles de mollusques, par exemple) y sont relativement rares.

La différence de couleur entre la surface jaunâtre et la masse bleuâtre de l'argile est due à un degré différent d'oxydation des sels de fer; le limon de la surface contient du fer peroxydé, tandis que dans les couches profondes, un certain degré de réduction s'opère, par la destruction peut-être des matières organiques, et le fer se change en protoxyde. Cette interprétation est exacte; elle est confirmée par l'expérience suivante que j'ai répétée vingt fois. Si je brasse le limon provenant d'un dragage, de manière à ce que toutes les couches soient bien mélangées, j'obtiens une vase crêmeuse de couleur uniforme que je verse dans un flacon; je la laisse reposer sous une couche d'eau qui maintient la masse humide. Au bout de quelques semaines je vois la couleur de la masse vaseuse complètement modifiée; à travers le verre transparent je distingue une couche supérieure, de quelques millimètres, jusqu'à 1^{cm} d'épaisseur, de couleur rougeâtre, jaunâtre, grisâtre, superposée à une couche profonde, de couleur noirâtre, bleuâtre, grisâtre, remplissant tout le bas du flacon. Les teintes varient avec les échantillons; mais la division en deux couches, l'une de surface plus rouge, l'autre de fond plus bleue, est constante. Dans la couche profonde ont eu lieu des fermentations dont l'action s'est traduite par une réduction des sels de fer, dans la couche superficielle les oxydations ont peroxydé les mêmes sels. Je présume que la couche noire (couche *c*), que je trouve fréquemment dans les coupes parfaites du limon du lac,

est le point où les phénomènes de réduction se font avec le plus d'intensité.

Lorsque le limon est riche en matières organiques et se rapproche de la fange, on reconnaît les phénomènes de fermentation, qui se produisent dans la couche profonde, par le dégagement des gaz à l'état aériforme ; on voit leurs bulles s'étendre en une lame argentée contre les parois du flacon où repose le limon, ou encore, — et c'est là le plus instructif, en nous révélant les faits qui se passent dans la nature, — remplir les galeries des annélides tubicoles ou des larves d'insectes (1) et venir sourdre à la surface en suivant ces canaux. Le gaz reste longtemps accumulé dans ces galeries communicantes qu'il envahit progressivement ; la masse de gaz fait ménisque convexe proéminent à l'orifice du tube, retenu en place par les attractions capillaires ; tout-à-coup, lorsque celles-ci sont vaincues, le gaz s'échappe en fusée et forme une ou plusieurs grosses bulles qui s'élèvent tumultueusement à travers l'eau pour venir éclater à la surface. Ces gaz sont le mélange d'acide carbonique, CO^2, et de méthane, CH^4, (gaz des marais) dont M. Hoppe-Seyler de Strassbourg a si bien étudié la formation. (2)

J'ai dit que dans le Petit-lac, le limon a une couleur plus jaunâtre que dans le Grand-lac ; il y a lieu de préciser la distinction de ces teintes différentes. J'ai ordonné d'après leur couleur les échantillons de limon que M. Hörnlimann m'a confiés, et j'ai trouvé la série suivante, allant du gris-bleuâtre au gris-jaunâtre. Le numéro que j'ai inscrit en chiffres arabes indique la position sur l'axe du lac, en s'avançant du Grand-lac vers Genève, le numéro en chiffres romains indique l'échantillon dont l'analyse chimique sera donnée plus loin.

(1) La perforation de l'alluvion actuelle par les galeries des annélides et larves me paraît fort intéressante en ce qu'elle explique la possibilité des modifications subies par la vase fraîchement déposée, qui se transforme en la marne argileuse compacte des couches sous-jacentes. Au moment de son dépôt, elle est encore riche en matières organiques ; par fermentation putride elle se débarrasse de ces éléments. Cette fermentation s'effectuerait-elle aussi bien si la masse n'était pas traversée par les mille canalicules des animaux qui l'habitent, et n'était pas ainsi conservée longtemps en contact avec l'eau ambiante ? Ces galeries s'obturent du reste par la pression mécanique des couches superposées, et l'argile profonde finit par devenir absolument imperméable.

(2) *Hoppe-Seyler*. Ueber die Gährung der Cellulose, etc. Zeitschr. f. physiol. Chemie X. 401 sq. Strassbourg, 1886.

Position	Nº d'analyse	Localité	Profondeur
		Ire série : Gris à la surface, bleuâtre dans les couches profondes	
13	XXVII	devant la pointe de la Bise	42m
14	XXX	près du banc de Travers, Genève	30m
12	—	barre de Genthod	49m
10	—	cuvette de Chevran	62m
8	—	devant Hermance	62m
9	XX	cuvette de Chevran	64m
6	—	barre de Messery	69m
7	XXVI	cuvette de Tougues	57m
		IIme série : Gris-jaunâtre dans toute l'épaisseur, sans couche profonde bleuâtre	
2	XXV	plafond du Grand-lac, rampe ascendante	90m
4	—	barre de Promenthoux	65m
5	—	barre de Promenthoux	67m
11	—	devant Versoix	63m
3	XIX	rampe ascendante du plafond du Grand-lac	71m
1	—	devant Dully — —	90m

Sauf l'échantillon dragué devant Versoix (position 11), lequel du reste différait de tous les autres par son abondante charge de sable, et provenait évidemment des alluvions de la Versoie, la couleur de ces limons correspondait fort nettement à une différence d'origine. Tous ceux qui étaient plus ou moins bleuâtres, et se séparaient en deux couches, grisâtre à la surface, bleuâtre dans le fond, venaient des cuvettes et barres du Petit-lac, au sud de la barre de Messery ; tous ceux qui étaient jaunâtres dans toute leur épaisseur, sans couche vaseuse dans la profondeur, venaient de la barre de Promenthoux ou de son versant dans le Grand-lac. Si j'essaie d'expliquer cette différence j'arrive à une conclusion qui me semble probable : Les échantillons jaunâtres de la barre de Promenthoux sont de l'alluvion lacustre impalpable, de dépôt excessivement lent et peu actif, qui a eu le temps de se débarrasser par la putréfaction de toutes les matières organiques qu'elle pouvait contenir primitivement ; il ne s'y produit plus de phénomènes de réduction des sels de fer ; — les échantillons à double teinte des cuvettes du Petit-lac représentent un dépôt plus rapide d'alluvion fluviatile impalpable ; le dépôt de cette alluvion étant plus actif, il reste dans l'épaisseur du limon des quantités encore notables

de matières organiques, et la réduction des sels de fer peut encore s'y effectuer.

La densité du limon d'alluvion du Léman a été déterminée par M. le professeur E. Chuard, de Lausanne, sur un échantillon dragué par M. Hörnlimann à 3500^m des bouches du Rhône, et 3000^m de la pointe de Clarens par 155^m de profondeur. (1) Sa densité, à la température de 12°, était 2.68.

Au point de vue chimique. Nous possédons un grand nombre d'analyses plus ou moins complètes des limons du lac Léman, dues à divers chimistes, mes amis. Je donnerai d'abord les résultats directs des analyses en proportions centésimales, puis j'essaierai de les grouper et d'en tirer des conclusions.

1° Analyses de M. E. Risler, actuellement directeur de l'Institut agronomique de Paris, alors à Calève, près Nyon, 1874. (2)

N° I. Echantillon de limon dragué par moi-même au milieu du lac, devant Morges, par 216^m de fond.

N° II. Limon dragué devant Morges par 35^m de fond.

2° Analyse de M. G. Hochreutiner, actuellement chimiste à Genève, alors assistant au laboratoire de M. le professeur Brunner à l'Académie de Lausanne, 1879. (3)

N° III. Limon dragué par moi-même à l'entrée du détroit de Promenthoux, côté du Grand-lac, par 70^m de fond.

	Risler et Walter		Hochreutiner
	I	II	III
Analyse chimique.			
A Partie attaquable par H Cl.			
Fer dosé à l'état d'oxyde	5.20	3.36	4.54
Alumine	2.30	1.80	15.87
Acide phosphorique	traces	0.12	traces
Chaux	10.50	12.39	14.01
Magnésie	2.06	1.92	3.92
Potasse et soude	traces	traces	traces
Acide carbonique	9.20	9.80	14.93

(1) Profil XXIVe, N° 27, Hörnlimann.

(2) *F.-A. Forel.* Matériaux pour servir à l'étude de la faune profonde du lac Léman. I série p. 13. Bul. S. V. S. N. XIII. 13, 1874.

(3) *F.-A. Forel.* Matériaux etc. V^e série p. 439. Bul. XVI, 149, 1879.

	Risler et Walter I	II	Hochreutiner III
Analyse chimique.			
Acide sulfurique	0	0	0
Silice soluble	0.12	—	1.22
B Partie inattaquable par H Cl.			
Silicates et silice	63,75	66.68	45.51
Matières organiques	4.67	3.73	3.85
Humidité	2.20		
Analyse physique.			
Sable	10		
Partie impalpable	90		

3° Analyse de feu le professeur H. Bischoff, de l'Académie de Lausanne, 1885.

N° IV. Echantillon (1) XXV, n° 22, Hörnlimann, par 172m de fond, sur la ligne Pointe de Peilz — Saint Gingolph à 3.8km des bouches du Rhône.

Limon séché à 150°.	Insoluble dans H Cl.	75.54
	Soluble	14.31
	Eau	10.15
Après calcination.	Silice et silicate	51.56
	Alumine, chaux, fer et acide phosphorique	26.64
	Chaux et magnésie	12.35
	Alcalis, etc.	5.45

4° Analyses faites, sur la demande de M. Delebecque, par M. Durand-Claye, directeur du laboratoire de l'école des Ponts et chaussées de Paris, des échantillons dragués par les ingénieurs français, 1890.

N°	V à 1000m du Locon	228m	de fond
—	VI à 2000m de Meillerie	281m	—
—	VII à 1300m de Lugrin	170m	—
—	VIII à 3250m d'Évian	309m	—
—	IX à 350m d'Amphion	35m	—
—	X à 2500m d'Excenevex	91m	—
—	XI à 3000m d'Yvoire, direction Allaman	95m	—
—	XII à 4300m d'Yvoire, direction Rolle	98m	—

(1) Les échantillons dragués par M. Hörnlimann et les aides de M. Delebecque sont caractérisés par le numéro du profil des sondages en chiffres romains, et le numéro du point en chiffres arabes. Comme il y a plusieurs séries de profils, j'indique en outre la position sur la carte du lac.

N°	XIII à 1150m	d'Yvoire, direction Prangins	56m	de fond
—	XIV à 1000m	du rivage entre Nernier et Messery	63m	—
—	XV	en face du château de Beauregard	2m	—
—	XVI à 380m	d'Hermance, près de la rive	13m	—

Echantillon N°	Résidu insoluble dans les acides	Alumine et peroxyde de fer solubles	Chaux	Magnésie	Acide carbonique, eau combinée et pertes
V	75.35	3.80	8.35	1.40	11.10
VI	61.30	6.10	13.75	1.60	17.25
VII	69.00	5.80	8.85	1.50	14.85
VIII	58.60	6.35	14.85	1.80	18.40
IX	47.80	4.80	22.10	1.70	23.60
X	59.50	6.00	17.70	1.35	15.45
XI	56.85	6.35	14.50	0.95	19.35
XII	57.40	6.10	16.10	1.30	19.10
XIII	62.25	5.35	14.50	1.10	16.80
XIV	55.30	5.20	18.05	1.10	20.35
XV	53.85	5.50	18.85	1.10	20.70
XVI	40.35	2.25	29.35	0.90	27.15

5° Analyses faites au laboratoire de M. le professeur L. Duparc de l'Université de Genève, 1890 et 1891.

N° XVII. Echantillon CLXXVII n° 26, Delebecque, entre Lugrin et Meillerie à 5km du rivage par 298m de fond.

N° XVIII. Echantillon CX n° 18, Delebecque, entre Ripaille et Saint-Prex, à 4.5km de la côte savoyarde, par 237m de fond.

N° XIX. Echantillon LX n° 19, Hörnlimann, à l'entrée du détroit de Promenthoux, côté du Grand-lac, à 2.8km d'Yvoire, dans la direction de Dully par 71m de fond.

Ces trois échantillons ont été analysés par M. P. Freundler, étudiant en sciences.

N° XIX (*bis*) au point 5 du profil C, Delebecque, dans la fosse de Tougues, entre Tougues et Hermance, à 1250m de la côte savoyarde, par 68m de profondeur. Analyse de M. L. Chavanne, étudiant en sciences.

N° XX. Echantillon XC n° 14, Hörnlimann, dans la fosse de Chevran par 64m de fond. Analyse de M. Emile André, étudiant en sciences. Cet échantillon contenait 5.94 % de sable, dont les grains pesaient jusqu'à 0.3 et 0.4g.

	N° XVII	XVIII	XIX	XIX *bis*	XX
Silice et silicates insolubles	70.40	60.09	62.25	56.72	41.29
Al_2O_3	6.25	6.15	6.25	2.94	11.28
Fe_2O_3					6.03
$CaCO_3$	16.48	26.46	28.55	33.26	31.18
CaO					2.61
$MgCO_3$	3.63	3.55	0.62	1.91	4.55
Eau et matières organiques	1.22	1.30	1.22	1.39	3.06

6° Analyses faites au laboratoire de M. le professeur H. Brunner de l'Université de Lausanne par M. P. Jaccard, étudiant en sciences, 1891.

N° XXI. Echantillon n° XXXIX^{a}, 1, Hörnlimann, devant les Grangettes près Villeneuve à 2300^{m} de la rive de la plaine du Rhône, et à 3^{km} de Chillon, par 104^{m} de fond.

N° XXII. Echantillon IX, 18, Hörnlimann, devant Saint-Saphorin, par 228^{m} de fond, au pied du talus, sur le plafond du lac.

N° XXIII. Echantillon XIII, 19, Hörnlimann, devant le Boiron près Morges, par 252^{m} de fond, sur le plafond, rampe ascendante.

N° XXIV. Echantillon XXXII, 21, Hörnlimann, devant l'Aubonne, par 205^{m} de fond.

N° XXV. Echantillon LIV, 24, Hörnlimann, devant Dully, au haut de la rampe ascendante du plafond, par 90^{m} de fond. Cet échantillon présentait tous les caractères du limon de la barre de Promenthoux, de couleur jaunâtre, sans trace d'une couche profonde bleuâtre.

N° XXVI. Echantillon LXXV, 19, Hörnlimann, sur la barre de Messery, par 57^{m} de fond.

N° XXVII. Echantillon XV, 11, Hörnlimann, devant la pointe de la Bise, par 42^{m} de fond.

Pour deux de ces échantillons, n° XXV, XXVII, M. Jaccard a déterminé par la calcination la teneur en matières organiques.

	Partie insoluble dans H Cl.	Partie soluble dans H Cl.	Matières organiques
N° XXI	71.20	28.80	
— XXII	62.32	37.68	
— XXIII	62.62	37.38	
— XXIV	55.46	44.54	
— XXV	62.74	37.26	5.36
— XXVI	61.5	38.5	
— XXVII	47.68	52.32	4.86

Si je reprends ces diverses analyses et si j'essaie d'en tirer des faits généraux, je n'arrive pas du premier coup à des résultats bien évidents. Même en m'adressant seulement aux chiffres d'un même auteur, obtenus par conséquent par la même méthode, et parfaitement comparables entr'eux, je ne trouve pas une variation régulière des éléments chimiques qui indique une loi bien marquée. Dans chaque série j'ai ordonné les analyses suivant la position des échantillons sur l'axe du lac, en commençant par le Haût-lac et en avançant du côté de Genève. Que l'on considère la série des analyses faites à l'école des Ponts et chaussées de Paris, la série la plus complète, il est impossible d'y voir une croissance ou une décroissance régulière, ni pour les silicates, ni pour la chaux, ni pour la magnésie, etc.

Cherchons cependant à grouper ces 27 analyses d'une manière intelligible, en ne considérant que l'un des éléments, le plus important, la valeur donnée pour la partie inattaquable par l'acide chlorhydrique, (1) c'est-à-dire la silice et les silicates insolubles. J'en formerai quatre groupes, suivant leur position dans le lac et j'aurai :

1er Groupe. *Cône d'alluvion du Rhône.*

		Distance de la côte			Profondeur	Silicates	
N°	XXI	suisse	3km	Montreux	104m	71	Jaccard.
—	IV	savoyarde	3.5km	St-Gingolph	172m	76	Bischoff.
—	V	—	1km	Locon	225m	75	P. et Ch. (2)
—	XXII	suisse	0.8km	St-Saphorin	228m	62	Jaccard.
—	VI	savoyarde	2km	Meillerie	281m	61	P. et Ch.
—	XVII	—	5km	Lugrin	298m	80	Freundler.
					Moyenne. . .	69 %	

2e Groupe. La *plaine centrale*, dont le sol est formé par l'alluvion impalpable du Rhône et de tous les affluents du Grand-lac.

N° VIII. 3 1/4km de la côte savoyarde, Evian, 309m, 58.60 P. et Ch.

Cette teneur en silicates est remarquablement faible. Faut-il y reconnaître le mélange, avec l'alluvion très siliceuse du Rhône, des éléments impalpables des affluents latéraux du lac venant du territoire secondaire ou mollassique, de la Drance en particulier, qui charrie une allu-

(1) Je supprime les décimales.

(2) Je désigne par ces deux lettres les analyses faites au laboratoire de l'école des Ponts et chaussées à Paris.

vion presque uniquement calcaire, comme nous l'avons vu à propos du sable de Thonon ?

3e GROUPE. Alluvion lacustre provenant des *talus latéraux du Grand-lac*, de la rampe ascendante du plafond, et de la barre de Promenthoux, versant du Grand-lac.

					Profondr	Silicates	
No	VII	devant	Lugrin	talus savoyard	170m	69	P. et Ch.
—	I	—	Morges	— suisse	216m	71	Risler.
—	XXIII	—	le Boiron	— —	252m	63	Jaccard.
—	XVIII	—	la Drance	plafond	237m	60	Freundler.
—	XXIV	—	Chanivaz	—	205m	55	Jaccard.
—	X	—	Excenevex	talus savoyard	91m	59	P. et Ch.
—	XXV	—	Dully	plafond	96m	63	Jaccard.
—	XI	—	Yvoire	—	95m	57	P. et Ch.
—	XII	—	—	dét. Promenthoux	98m	57	—
—	XIX	—	—	— —	71m	62	Freundler.
—	III	—	—	— —	70m	49	Hochreutiner.
—	XIII	—	—	— —	56m	62	P. et Ch.
					Moyenne. . .	61 %	

J'ai laissé de côté le no II à 35m de profondeur devant Morges, et le no IX à 35m devant Amphion. C'est presque dans la région littorale, et l'alluvion lacustre peut y être mélangée d'une notable quantité de sables et poussières provenant de la beine et de la grève.

4e GROUPE. *Petit-lac*. Je réunis ensemble les échantillons venant des cuvettes et barres du Petit-lac ; ils me donnent pour la partie insoluble dans l'acide chlorhydrique les chiffres suivants :

			Profondeur	Silicates	
No	XIV	Fosse de Nyon	65m	55	P. et Ch.
—	XXVI	Barre de Messery	57m	61	Jaccard.
—	XIX (*bis*)	Fosse de Tougue	68m	57	Chavanne.
—	XX	Fosse de Chevran	64m	41	E. André.
—	XXVII	Fosse de Bellevue	42m	52	Jaccard.

Il y a là une irrégularité considérable dans les résultats : le no XXVI, sur la barre de Messery, nous donne une teneur de silicates égale à la moyenne des échantillons de la partie occidentale du Grand-lac ; le no XX, le chiffre le plus bas de l'ensemble du lac. La moyenne entre

ces cinq valeurs est 53 pour cent de silicates, chiffre notablement inférieur à ceux des autres groupes.

5e Groupe. *Région littorale.* Enfin je réunis ensemble les échantillons dragués près de la rive, où je crois devoir admettre un mélange plus ou moins important d'alluvion littorale, ce sont :

				Profondeur	Silicates	
N° II	devant	Morges	Grand-lac	35m	70	Risler.
— IX	—	Amphion	—	35m	48	P. et Ch.
— XV	—	Beauregard	Petit-lac	2m	54	—
— XVI	près	d'Hermance	—	13m	40	—

Je puis maintenant mettre en présence les moyennes de ces divers groupes, en laissant de côté le dernier, trop affecté par des influences locales, et je trouve les chiffres suivants :

1er groupe	Cône d'alluvion du Rhône	69 %
3e —	Partie occidentale du Grand-lac	61 —
4e —	Petit-lac	53 —

Il y a là une loi qui paraît claire : La richesse en silicates va en diminuant à mesure qu'on avance dans le lac en s'éloignant du Rhône du Valais ; la grande source des éléments siliceux est dans l'alluvion de ce fleuve. C'est du reste conforme à tout ce que nous apprend la pétrographie du bassin d'alimentation des divers affluents du lac ; le Rhône a une notable partie de ses sources en territoire cristallin des hautes Alpes du Valais ; les affluents latéraux du Léman sont tous dans des terrains secondaires ou tertiaires, en territoire calcaire et mollassique. (1)

Au milieu de cette décroissance progressive et bien marquée des éléments siliceux, il est intéressant de voir l'alluvion de la plaine centrale (n° VIII) signalée par une aussi faible teneur en silicates, 59 % seulement ; je n'aurais pas attendu, je l'avoue, une action aussi évidente de l'alluvion des affluents latéraux du lac ; leur faible débit m'aurait fait croire à une prédominance absolue de l'alluvion du Rhône. Je m'incline devant les résultats de l'analyse.

Je ne poursuis pas plus loin cette comparaison des chiffres des analyses ; j'arriverais à des conclusions analogues, mais en sens inverse si je m'adressais à la teneur en chaux, en magnésie, etc. Le lecteur que

(1) Ce territoire calcaire et mollassique est cependant recouvert de terrains glaciaires ; cela explique la richesse encore assez grande en éléments siliceux de l'alluvion qui en provient.

cette question intéresse en trouvera les éléments dans les chiffres originaux que j'ai donnés plus haut.

Mais en terminant je dois tirer de cette étude générale une déduction importante : c'est la variabilité considérable qui existe, d'une localité à l'autre, dans la composition chimique de l'alluvion du même lac. Cette alluvion, qui est si uniforme au point de vue physique, qui diffère à peine par quelques nuances de la coloration, varie grandement dans la proportion des éléments chimiques qui la constituent. Au point de vue stratigraphique elle formerait une couche continue, unique ; au point de vue chimique elle différerait considérablement d'une région à l'autre. Cette conclusion me paraît présenter un intérêt général, justifiant le développement qui m'y a amené.

La moyenne générale des vingt-huit analyses du limon du Léman donne pour la partie insoluble dans H Cl, à savoir silice et silicates 59.84, soit en nombre rond 60 %.

Au point de vue minéralogique je me suis adressé à M. le professeur Dr C. Schmidt de Bâle, en lui remettant les échantillons de limon du Léman :

N° XXVIII. Hörnlimann XXXV, 20, dans le Haut-lac, au large de Clarens, à distance égale, 3km, de Clarens, Montreux et le Vieux Rhône, 130m de profondeur.

N° XXIX. Hörnlimann III, 1, sur la ligne Morges-Amphion, à 7km de Morges, au bas du talus suisse, à l'angle occidental de la plaine centrale, par 287m de fond.

N° XXX. Hörnlimann XI, 12, Petit-lac, fosse de Bellevue, près Genève, 30m de profondeur.

Voici la traduction du rapport que M. Schmidt a eu l'obligeance de m'envoyer en date du 15 avril 1891 : « Les trois échantillons de limon ont été étudiés au microscope, aussi bien sur des préparations dans l'eau que dans du baume de Canada, aussi bien à l'état naturel qu'après élimination des carbonates et des matières organiques par traitement à l'acide chlorhydrique et par calcination. Les minéraux qui ont pu être reconnus sont : carbonates, quartz, chlorite, muscovite (mica potassique), épidote, orthoclase, plagioclase, tourmaline, zircon et rutile. Les trois dernières espèces se trouvent toujours à l'état de cristaux intacts ; l'épidote apparaît soit en grains, soit en cristaux allongés suivant l'axe *b* ; les autres minéraux ne se

rencontrent qu'à l'état de fragments cristallins, quelquefois assez gros. Entre ces minéraux est une masse argileuse, en flocons arrondis, épais, souvent brunâtres. Tous les échantillons contiennent de nombreux squelettes de diatomées. Le nº XXVIII est relativement pauvre en substance argileuse et se distingue par cela des deux autres. Le nº XXX est très riche en diatomées. En somme les échantillons de limon du Léman sont très analogues à ceux du lac de Constance [1] que M. C. von John, de Vienne, a étudiés. »

Il résulte de ce rapport que l'alluvion du lac est un mélange de particules très fines, d'origine détritique, amenées par transport mécanique dans l'eau du lac. Mais y a-t-il en même temps des précipités chimiques ? En particulier y a-t-il précipité chimique du carbonate de chaux qui, comme nous le verrons, est assez abondant dans l'eau du Léman ? On sait que dans certaines eaux, dans certains lac (lac de Zurich), le carbonate de chaux se précipite sous forme de fines granulations amorphes qui constituent une partie importante de l'alluvion, laquelle prend alors le caractère de craie lacustre (*Seekreide*). En est-il de même pour le Léman ? J'ai posé la question à M. le professeur Schmidt ; il m'a répondu : « Je ne puis dire s'il se trouve dans l'alluvion du Léman du carbonate de chaux à l'état de précipité chimique. Il n'y a pas de caractères distinctifs qui séparent absolument la chaux en fin détritus mécanique, de la chaux précipitée chimiquement ; dans cette dernière, il se développe parfois des globulites (*Sphærokrystalle*), mais ce n'est pas toujours le cas. » M. le professeur L. Duparc de Genève est plus affirmatif ; à mes questions il a toujours répondu qu'il ne pouvait, dans les échantillons de vase du Léman soumis à son examen, reconnaître trace de précipités chimiques ; il tient toute cette alluvion pour un mélange de nature détritique.

En tous cas, s'il y a précipité chimique, il doit être très peu abondant. L'alluvion du Léman n'a aucunement les caractères de la craie lacustre ; elle est beaucoup plus ferme, plus adhérente, plus plastique que celle-ci, qui est plus légère. Du reste nous verrons plus loin, quand nous étudierons les incrustations tufeuses, qui sont des dépôts chimiques sous l'influence de la végétation des algues, combien elles sont peu développées dans notre lac, en comparaison de ce que l'on trouve ailleurs.

[1] Rapport du 17 avril 1890 à la commission d'étude du lac de Constance.

Au point de vue pétrographique, quel nom devons-nous donner à la roche formée actuellement au fond du Léman par les alluvions modernes? Elle est de consistance argileuse, elle est plastique, elle se laisse modeler et cuire; (1) pour un potier ce serait de l'argile. Mais quelle est sa nature pétrographique?

D'après les analyses ci-dessus développées, elle est constituée essentiellement par un mélange de 40 à 75 % de silice et silicates, et de 10 à 30 % d'oxydes de calcium et de magnésium qui dans la nature pourraient représenter de 18 à 52 % de carbonates de chaux et de magnésie; puis de 2 à 6 % d'alumine et oxyde de fer. (2) C'est donc de l'argile fortement chargée de chaux. C'est donc dans le langage pétrographique une marne. L'alluvion moderne du Léman est une marne plus ou moins calcaire, d'autant plus calcaire qu'on l'étudie plus loin des bouches du Rhône, avec des proportions variables d'une localité à l'autre dans des limites assez étendues.

Ne serait-ce pourtant pas le cas d'appliquer à cette formation le nom de craie lacustre qui, depuis O. Heer, est donné dans la Suisse allemande plus ou moins indistinctement à toute alluvion lacustre contenant une forte quantité de carbonate de chaux? Si j'interroge l'auteur qui a le mieux traité de la craie lacustre, le professeur F.-J. Kaufmann, à Lucerne, (3) je constate qu'il donne ce nom non seulement au dépôt crayeux blanchâtre qui constitue l'alluvion profonde des étangs tourbeux, mais encore à l'alluvion des lacs de Zoug, de Sempach, des Quatre-Cantons, etc.; que, d'après les analyses de M. R. Stierlin, la proportion de matériaux insolubles dans l'acide chlorhydrique y varie de 4 à 36 % L'alluvion du Mauensee, petit étang tourbeux dans les environs de Sursee, alluvion que Kaufmann appelle encore craie lacustre, contient 36 % de silicates, silice, etc., et se rapproche d'assez près par sa composition de nos marnes calcaires du Léman. Cette dernière, tout au moins celle du Petit-lac qui a souvent moins de 50 % de silicates, ne devrait-elle pas être considérée comme craie

(1) J'en ai obtenu par la cuisson des vases très légers, très sonores, très solides, d'une très grande finesse de pâte, quelquefois orangés, d'autres fois blanc-jaunâtres.

(2) L'échantillon N° III renfermait près de 16 % d'alumine (Hochreutiner), l'échantillon XX contenait 11 % d'alumine et 6 % d'oxyde de fer (André). A quoi tiennent ces différences énormes? Je ne le sais.

(3) Beiträge zur geolog. Karte der Schweiz, XI, 351, Bern 1872.

lacustre ? Je ne le crois pas. Ce qui, d'après les analyses minéralogiques et microscopiques de Kaufmann et Stierlin, caractérise la craie lacustre, est l'abondance, la prédominance des précipités cristallins, précipités chimiques, de carbonate de chaux. Or, nous avons vu que cette nature d'éléments ne peut pas être reconnue dans l'alluvion du Léman ; si elle y existe, ce qui n'est pas encore prouvé, elle n'y est pas évidente. Donc l'alluvion du Léman n'est pas de la craie lacustre. Que, du reste, la craie lacustre proprement dite puisse se former dans notre région, c'est ce qui résulte de sa présence parfaitement caractérisée sur le fond du lac de Bret, où elle est apparue avec toute évidence lors de l'abaissement du niveau de ce lac en 1875 ; sur les bords de ce lac qui se sont éboulés par suite de la baisse des eaux et ont montré la coupe du terrain, la craie lacustre représentait, entre l'argile glaciaire profonde et la tourbe superficielle, une couche d'un blanc brillant, friable, presque pulvérulente à l'état sec, atteignant jusqu'à 1.5^{m} d'épaisseur. L'alluvion du Léman n'a aucunement les caractères de cette craie lacustre que nous avons pu étudier à loisir dans cette circonstance.

Cette marne est imperméable ; elle forme un banc impénétrable à l'eau et protège les couches sous-jacentes contre les infiltrations.

Signalons dans la marne argileuse du Léman l'absence absolue de toute espèce de nodule ou rognon de silice, de carbonate ou de phosphate de chaux, de gypse, d'oxyde de fer ou de peroxyde de manganèse, tels qu'on en trouve parfois dans les terrains anciens ou modernes. Jamais, dans aucun de nos dragages, nous n'en avons constaté traces.

Au point de vue de l'origine des matériaux, voici dans des termes très généraux ce que nous pouvons en dire :

La silice, les silicates, l'alumine, [1] une partie des sels de fer

[1] L'alluvion du lac est très plastique ; elle contient de notables proportions d'alumine libre révélée par les analyses chimiques. D'où provient cette alumine qui ne se rencontre généralement qu'à l'état de sels dans les matériaux primitifs du bassin d'alimentation. Ne doit-on pas la chercher dans la décomposition des feldspaths et autres roches alumineuses réduites par la trituration à l'état de poussière impalpable ? C'est ce qui semble résulter de l'expérience suivante : En octobre 1875, je faisais des essais sur la taille des pierres pour étudier les procédés antiques de fabrication des haches archéologiques ; j'aiguisais une hache de gabbro façonnée avec un caillou du terrain erratique, en la frottant sur une meule dormante en pierre de molasse. La boue que produisait cette trituration présentait une consistance plastique très évidente ; je la décantai pour en enlever le sable trop grossier, et je pus en modeler un vase qui résista parfaitement à la cuisson. J'avais donc obtenu de l'argile par le frottement de ces deux pierres non argileuses l'une sur l'autre.

viennent des terrains cristallins des hautes Alpes du Valais, soit directement par l'apport moderne du Rhône, soit indirectement par le transport de l'ancien glacier du Rhône, dont les dépôts sont repris actuellement par l'érosion des torrents. Une partie aussi de ces éléments peut venir des couches argileuses et marneuses des poudingues et grès des terrains secondaires et tertiaires.

Les carbonates de chaux et de magnésie viennent essentiellement des calcaires et dolomies des terrains secondaires alpins et jurassiens, des terrains tertiaires de la plaine. Une partie des oxydes de fer doivent avoir la même origine.

Il est intéressant de constater, dans les trois seules analyses qui aient tenu compte de l'acide sulfurique (n^os I, II et III) l'absence de cet élément. Etant connue l'abondance des gypses dans le bassin d'alimentation du lac, soit dans les terrains secondaires (gypses de Bex, Armoy, etc.) soit dans les terrains tertiaires (gypses fibreux de l'aquitanien), nous aurions attendu au moins des traces de ce minéral. Les chimistes ne l'ont pas trouvé ; il faut qu'il se dissolve entièrement dans l'eau du lac, (1) où nous le trouverons du reste représenté.

Un terme intéressant de comparaison avec les alluvions du lac sera l'analyse de l'alluvion de trois rivières du Valais par M. E. Risler. (2) Il a trouvé entr'autres :

	Chaux.	Ac. carbonique.	Silice et silicates.	Autres matières. (3)
Alluvion de la				
Morge de Conthey.	22.8	11.0	48.5	19.7
Sionne	21.7	17.7	49.4	11.2
Borgne.	2.3	1.7	88.1	7.9

La Morge et la Sionne viennent du nord, de la chaîne des Alpes bernoises, presque-entièrement en territoire secondaire ; leur alluvion est relativement beaucoup plus riche en chaux. La Borgne, dont le limon est presque uniquement siliceux, amène les eaux de la vallée d'Hérens et d'Hérémence, soit de la grande chaîne des Alpes valaisan-

(1) On sait que le gypse se transforme très facilement en carbonate en présence de l'acide carbonique et d'un peu de soude ou de potasse. (Note de M. le professeur H. Golliez de Lausanne.)

(2) Journal de la Société d'agriculture de la Suisse romande. XVIe année, 75, 1875.

(3) Dans cette colonne j'ai fait la somme des chiffres donnés par l'analyse pour l'acide phosphorique, la potasse, la soude, la magnésie, le sesquioxyde de fer, l'alumine, les matières organiques et l'eau.

nes, chaîne du Mont-Rose. Or, comme la plupart des grands affluents du Rhône, la Viège, la Navisence, la Borgne, la Dranse, viennent de cette chaîne, — la Massa, qui vient du glacier d'Aletsch étant le seul affluent important de la chaîne bernoise, (1) — le limon de la Borgne représente mieux que celui des deux autres rivières le type dominant dans l'alluvion du Rhône. Sa richesse en silice donne donc, en partie, l'explication de l'abondance de cet élément dans l'alluvion du Léman.

Analogies et comparaisons. L'étude que nous faisons ici est une monographie, et nous ne voulons pas nous laisser trop entraîner dans des comparaisons qui pourraient nous mener très loin. Il nous sera cependant utile de dire quelques mots de l'alluvion des autres lacs subalpins en renvoyant pour les détails à ce que nous avons publié ailleurs. (2) Au point de vue physique, la marne plus ou moins calcaire que la drague recueille est peu différente d'un lac à l'autre : mêmes caractères de ténuité extrême des particules minérales, vase fine avec traces accidentelles de sable ; mélange de débris organiques d'autant plus nombreux que le lac est plus petit, et, semble-t-il, que son limon est plus calcaire ; tendance à la division de la marne en deux couches, l'une superficielle plus rougeâtre, siège de phénomènes d'oxydation, l'autre profonde, plus bleuâtre, sous des actions de réduction de sels de fer ; la couleur de la marne est plus blanchâtre dans les limons calcaires qui tournent à la craie lacustre, plus bleuâtre dans les limons siliceux qui tendent vers l'argile ; enfin, la consistance est d'autant plus ferme et plus plastique que le limon, plus siliceux, contient plus d'alumine et moins de chaux. Les types extrêmes seraient la craie lacustre et l'argile.

Je tire des analyses complètes de MM. Risler et Walter (3) quelques chiffres indiquant en tant pour cent la partie insoluble dans l'acide chlorhydrique, à savoir les matières organiques (3 à 4 $^0/_0$) et la silice et les silicates. On y verra les allures de la composition chimique de l'alluvion de cinq lacs de types fort divers.

(1) Le bassin du Rhône, au-dessus de St-Maurice, a les $^7/_{10}$ de sa superficie sur la rive gauche du fleuve, soit dans la chaîne des Alpes valaisannes, les $^3/_{10}$ seulement sur la rive droite, dans la chaîne des Alpes bernoises.

(2) *F.-A. Forel.* Faune profonde des lacs suisses, p. 55, sq.

(3) *F.-A. Forel.* Matériaux, etc. Bull. S. V. S. N. XIV, 122, 1877.

Limon du	Parties insolubles dans HCl.	Silicates.
Léman,	70 %	66 %
Lac de Constance,	45 —	41 —
Lac de Zurich,	38 —	34 —
Lac de Neuchâtel,	32 —	29 —
Untersee, lac de Constance inférieur,	31 —	27 —

Des échantillons analysés, ceux du lac Léman étaient les plus siliceux, celui de l'Untersee le plus calcaire.

Cherchons enfin à comparer l'alluvion lacustre du Léman avec les dépôts analogues de la mer, dépôts littoraux, dépôts d'eau profonde, dépôts abyssaux. (1) Même au milieu de la plaine centrale du lac, à 7km des rives et par 300m de fond, nous serions semble-t-il, dans les conditions de ce que, dans l'océan, on appelle les dépôts *côtiers* ou *littoraux*; à cette distance et à ces profondeurs on est, dans la mer, bien loin de la région profonde. Mais, ainsi que nous le verrons successivement dans les autres chapitres de cette étude, les proportions relatives des diverses zones sont beaucoup plus petites dans un lac que dans les vastes étendues de la mer; toutes les dimensions sont réduites dans les lacs, et les mesures applicables dans l'océan sont toujours trop grandes pour nos petits bassins d'eau méditerranéenne. C'est pour cela que dans le Léman nous devons réserver le nom de *dépôts littoraux* ou côtiers à ce que nous avons appelé les alluvions grossières, soit fluviatiles, soit lacustres, et que nous pouvons donner le nom de *dépôts profonds* à nos alluvions impalpables, qu'elles soient d'origine lacustre ou d'origine fluviatile. Il n'y a que les *dépôts abyssaux* de l'océan qui ne soient pas représentés dans notre lac; ces argiles des très grands fonds marins, à plus de 5000m de la surface, qui ne renferment plus trace d'alluvion fluviatile ou littorale, ces régions étant trop éloignées des embouchures de fleuves ou des rives, qui ne renferment plus de débris d'organismes pélagiques, les cadavres ayant eu le temps de se dissoudre dans l'eau de mer pendant la chute très prolongée qui les a amenés dans ces grands fonds, ces dépôts abyssaux n'existent pas dans nos lacs.

(1) *Thoulet.* Océanographie statique, 165, Paris 1890.



VII. **Cailloux enchassés dans le limon des grands fonds du lac.**

Si, dans les dragages faits près de la rive, on trouve une assez grande abondance de cailloux, ceux-ci deviennent plus rares à mesure que l'on avance en plein lac ; à une certaine distance de la côte, l'on n'en rencontre plus normalement. Exceptionnellement, la drague en ramène cependant parfois, et ces trouvailles méritent d'être étudiées et expliquées.

Si nous remontons l'histoire géologique de notre pays, nous constatons que le territoire du lac a été entièrement recouvert par le glacier du Rhône ; dans son mouvement de progression en avant, le glacier a déposé sur ce fond le terrain glaciaire que nous retrouvons partout sur la terre ferme ; dans sa retraite il a laissé choir au fond de l'eau toutes les pierres et cailloux qu'il portait à sa surface. Le fond du lac renferme certainement le même revêtement de terrain glaciaire qui caractérise notre pays sub-alpin.

Or ce terrain erratique, nous ne le retrouvons, à une exception près sur laquelle nous allons revenir, nulle part sur le sol du Grand-lac ailleurs que sur la rive, et encore seulement là où elle est rongée par l'érosion. Dans le Grand-lac, du moment où nous sommes à plus de quelques centaines de mètres du rivage, nous n'avons plus rien que du limon : jamais ma drague, jamais les sondes de MM. Gosset, Hörnlimann, Delebecque et ses ingénieurs n'ont frappé sur un bloc erratique. Tous les débris que le glacier du Rhône des temps antiques a laissés au fond de notre vallée, tout ce terrain glaciaire est recouvert par une couche uniforme et monotone de limon. Quelle en est l'épaisseur ? nous ne le savons pas, mais nous devons la supposer assez puissante, car cette couche a, dans son dépôt régulier et continu, réussi à recouvrir toutes les inégalités et irrégularités du fond, aussi bien sur les talus du lac que dans la plaine centrale, plate et sans accidents, que nous avons décrite dans un paragraphe précédent. Cette couche est formée par ce que nous avons appelé l'alluvion lacustre et l'alluvion fluviatile impalpable, dépôts composés de la poussière infiniment ténue du transport des rivières, de l'érosion des vagues sur

la côte, des débris organiques, enfin, des faunes et flores pélagiques et profondes. Le fond du lac, s'il était soulevé et mis à sec, montrerait donc des couches d'argile marneuse absolument privées de tout mélange étranger.

Mais si nous nous rapprochons du rivage, tout en restant encore au pied du mont, c'est-à-dire en dehors de l'action des vagues et des torrents, nous trouvons parfois un transport encore assez important.

Dragage nº I. Devant Morges, 19m de fond, 550m du rivage. Masse générale : argile très fine. (1)

11 grains de sable,	0.30g
1 fragment de brique en terre cuite,	0.05
30 morceaux de scories de coke des fournaises des bateaux à vapeur,	7.50

Dragage nº II. Devant Morges, 22m de fond, 580m du rivage. Masse du limon : argile très fine.

2 cailloux brisés, gneiss,	208g
1 caillou roulé, grès,	15
30 graviers, les uns cassés, les autres roulés, de roches très différentes,	88
Petit gravier et sable,	136
6 morceaux de scories de coke,	4

Je n'ai reconnu de stries glaciaires sur aucun de ces cailloux.

Dragage nº III. Devant Morges, 30m de fond, 650m du rivage. Masse du limon : argile très fine.

1 caillou roulé, calcaire jaune,	41g
1 — calcaire noir,	5
4 graviers ou gros sable roulé du lac,	1
9 morceaux de coke,	3

Dragage nº IV. Devant Morges, 44m de fond, 1150m du rivage. Limon argileux très fin, sans cailloux, graviers ni sable.

Dragage nº V. Devant Ouchy, 295m de fond, 3000m du rivage. Argile très fine, sans graviers ni sable.

(1) La quantité de limon que ramène ma drague est de 1 $1/2$ litre.

Deux grains de scorie de coke, gros comme des grains de blé.

De ces quelques exemples, je puis tirer les conclusions suivantes :

1° Au-delà d'un kilomètre du rivage, les cailloux ou graviers sont très rares, absolument accidentels.

2° A moins d'un kilomètre du rivage ils sont plus fréquents.

3° Ces cailloux sont assez lourds, — j'en ai pesé de 191 grammes, — pour qu'on ne puisse les supposer entraînés par les courants du lac ; ils se trouvent à une profondeur telle que l'action des vagues ne peut expliquer leur présence. Celle-ci est donc due à une action de transport par la surface du lac.

4° Ce ne sont pas des cailloux glaciaires du sol primitif du lac qui aurait été dénudé ou n'aurait été recouvert que par une très faible couche d'alluvion. Le grain de terre cuite du dragage n° I est d'origine moderne.

5° Les procédés de transport suivants sont les seuls admissibles :

a La chute hors des barques chargées de pierres qui circulent sur le lac ; cette origine est la seule possible pour certains graviers trouvés fort loin des rives. Ainsi, dans un dragage fait le 1er novembre 1877 par 65m de fond, devant Morges, je trouvai une grande quantité de graviers et de sables glaciaires ; deux dragages de contrôle faits sur la même ligne, l'un par 50m, l'autre par 80m de fond, ont donné de l'argile absolument pure de toute inclusion de sable ; de là je conclus que les graviers et sables du dragage à 65m étaient dus à une cause fortuite. Quant à l'origine plus précise de ces graviers, elle m'a été indiquée par une trouvaille faite le 12 décembre 1878 dans le produit d'un dragage par 110m de fond à 3km du rivage devant Morges. Deux cailloux roulés, du poids de 25 et de 12g, étaient noyés dans une argile très fine. La plus grosse de ces pierres était recouverte du revêtement de sable et de fin gravier fortement adhérent qui caractérise certaines gravières des anciennes terrasses d'alluvion des bords du lac. Mes bateliers, qui s'occupent habituellement au transport de ces graviers, y ont immédiatement reconnu l'objet de leur industrie. Ces graviers tombés des barques sont distribués d'une manière nécessairement fort irrégulière ; une telle origine ne peut être attribuée aux pierres et graviers qui sont localisés sur une bande de un kilomètre de largeur à partir de la rive.

b Le transport par les racines d'arbres doit être peu important. Les

arbres arrachés à la rive par l'érosion des hautes eaux du lac ont leurs racines lavées par les vagues avant que la plante soit entraînée en plein lac; les arbres amenés au lac par les eaux des torrents débordés sont peu nombreux et leurs racines sont de même lavées par les courants violents qui les charrient.

c Il ne reste comme moyen de transport un peu efficace que les glaçons, glaces de rivage et glaces de rivières. [1] Ces glaçons, entraînés dans le lac, ne tardent pas à fondre dans les eaux relativement chaudes de la région pélagique, et les sables et cailloux dont ils sont chargés ne peuvent ainsi pas être transportés fort avant dans le lac. De là leur localisation dans une bande peu large, près des côtes.

6° Ces cailloux et graviers renfermés dans l'argile lacustre, sans être très communs, ne sont pas cependant extrêmement rares ; dans mes dragages en région profonde, exécutés à moins d'un kilomètre de la rive, j'en trouve au moins une fois sur dix ; d'une autre part leur transport par les barques, les racines et les glaçons, doit être un fait très extraordinaire. L'on peut conclure, semble-t-il, de la rareté du transport et de la fréquence relative des graviers, que le dépôt de l'alluvion du lac doit être peu important, que la couche qui se précipite annuellement doit être peu épaisse, que par conséquent les corps étrangers tombés au fond du lac sont longtemps avant d'être enfouis dans le limon, que par conséquent notre drague, quoique pénétrant peu profondément, récolte l'argile et les cailloux déposés au fond du lac pendant un grand nombre d'années.

J'ai un seul fait, et encore est-il peu précis, qui puisse donner une idée de l'activité du dépôt de l'alluvion lacustre. Dans un dragage fait le 10 juillet 1877 par 60^{m} de fond, devant Morges, j'ai trouvé un morceau de scorie de coke, enfoui dans une couche intacte de limon, à à 3.5^{cm} de la surface. Cette scorie, provenant évidemment d'un bateau à vapeur, ne peut pas être plus ancienne que 1823, époque du lancement du premier pyroscaphe sur le Léman, et datait au plus de 54 ans. Elle peut être beaucoup plus récente.

[1] Nous ne connaissons pas, dans le lac, la formation des glaces de fond *(Anchor-ice, Grundeis)*, mais comme il s'en forme dans les rivières, je dois les indiquer aussi.

VIII. La moraine sous-lacustre d'Yvoire, Omblières d'Yvoire.

Au large d'Yvoire, à 1.5km et 2km du rivage, dans la direction de Rolle et par 60m de profondeur moyenne, sont situées les omblières d'Yvoire, célèbres par les pêches fructueuses qui s'y font. C'est là que vient frayer le précieux salmonidé, l'omble-chevalier, le plus délicat des poissons du lac et que les pêcheurs d'Yvoire le capturent avec un succès constant et sans analogue dans aucune autre région du Léman. A quoi est due l'attraction qui amène le poisson dans ces parages?

Les filets des pêcheurs dans cette localité s'accrochent souvent sur le sol; ils apportent fréquemment dans leurs mailles des cailloux et des débris de roches. Il y a là une moraine sous-lacustre. Une moraine... cela est prouvé par la nature des pierres recueillies par les pêcheurs. J'ai pu étudier une cinquantaine d'échantillons récoltés sur les omblières par maître Dufour, pêcheur à Yvoire et ses collègues, et j'ai constaté que ces débris appartiennent à toute espèce de roches alpines; les calcaires présentent une singulière érosion sur laquelle je vais revenir. Nous avons de plus, M. Delebecque et moi-même, fait quelques recherches sur place; en voici le résultat:

Le premier en date de mes dragages est celui que j'ai fait le 30 décembre 1876 avec mon ami A. Revilliod, à bord de son yacht le *Caprice*; j'avais désiré vérifier l'existence d'une barre au détroit de Promenthoux, que la carte de la Bêche m'avait fait soupçonner, et j'en avais reconnu la réalité; un dragage que j'effectuai en terminant mes opérations m'a donné (je copie mes notes): « par 70m de fond, masse de limon très fin, jaune clair, moins bleu que celui de Morges, rempli d'un très grand nombre de graviers. J'en pèse 7 grammes, les plus gros du volume d'un quart de noisette, les plus petits du sable. Il n'y a point de débris de brique ou d'argile cuite, point de pierres météoriques reconnaissables, point de scories de coke, très peu de cadavres d'entomostracés pélagiques; ce ne sont que des sables glaciaires. Que sont ces graviers?... »

J'avais oublié cette première trouvaille lorsque je repris la question en 1885. (1)

(1) *F.-A. Forel.* La barre d'Yvoire, Bull. S. V. S. N. XXII, 125, Lausanne 1887.

Depuis plusieurs années notre ami F. Bocion, d'Ouchy, le peintre du lac Léman, nous racontait que les pêcheurs d'Yvoire rapportaient dans leurs filets à omble-chevalier, mouillés à 60^{m} de profondeur devant Yvoire, des pierres qui l'intriguaient fort. Les échantillons qu'il nous montrait étaient des fragments de calcaire alpin, noir ou blanc, fortement érodés par une action chimique puissante. Une première expédition que nous fîmes le 12 juillet 1885, MM. Bocion, J.-B. Schnetzler, F. Recordon et moi, n'aboutit à aucune démonstration. J'y retournai seul le 18 septembre, avec le jeune pêcheur François Dufour, d'Yvoire, qui m'indiquait les stations favorites de l'omble, et j'eus enfin un succès complet. Je relevai dans ma drague le mélange caractéristique de cailloux roulés, de cailloux brisés et de sables, composés de toutes les roches possibles du Valais, granites, gneiss, quartzites, poudingues, grès, calcaire alpin, etc. J'étais incontestablement sur une moraine, saillante sur le sol, par 60^{m} d'eau, à plus d'un kilomètre du rivage au nord d'Yvoire. La barre d'Yvoire est donc revêtue d'une moraine glaciaire.

Depuis lors cette découverte a été confirmée. Le 16 mai 1889, je fis, avec M. A. Delebecque, trois dragages qui me donnèrent, au milieu d'une vase très fine, jaunâtre, une grande abondance de graviers et de sables de toutes grosseurs, de toute nature, le mélange classique des sables glaciaires. Le 13 février 1891 M. Delebecque a répété ces dragages et a obtenu le même résultat.

Dans ces opérations de dragage, ma sonde s'est plusieurs fois accrochée dans le fond, comme cela arrive parfois aux filets des pêcheurs ; j'en conclus qu'il y a sur le sol de gros blocs saillants. Il est vrai que nos dragues ne nous ont rapporté que des sables et graviers, mais cela tient évidemment à la petite taille de nos appareils.

L'analyse de ces graviers en démontre la nature glaciaire incontestable.

Ajoutons que les filets des pêcheurs ramènent fréquemment de ces régions une mousse abondante, en bel état de végétation, le *Thamnium alopecurum* var. *Lemani*, Schnetzler, que nous décrirons dans un autre chapitre. Cette mousse est insérée sur les pierres; nous en avons reconnu l'adhérence sur plusieurs échantillons. Elle se développe sur place; nous avons vu plusieurs fois la face libre des cailloux recouverte d'une couche verte, dans laquelle M. le Dr J. Dufour, de Lausanne, a reconnu les premiers stades du développement du végétal, *prothallium*

ou *protonema*. [1] Donc la surface des pierres est dégagée dans l'eau, et n'est pas enfouie sous un recouvrement de vase.

Quelle est l'étendue des moraines sous-lacustres d'Yvoire? Elle semble considérable. A en croire les pêcheurs d'Yvoire, il y aurait trois omblières dont la position leur est parfaitement connue et qu'ils retrouvent par des alignements sur la côte. Mais lorsque M. Delebecque et son commis M. Garcin ont, dans trois expéditions successives, été relever la situation de ces gisements, les pêcheurs les ont conduits à des points assez différents les uns des autres ; de telle sorte que les trois séries de points, relevés au sextant et rapportés sur la carte, ne se superposent pas exactement. Ils couvrent ensemble un vaste espace trapézoïde d'un kilomètre environ de côté, le diamètre oblique étant de 1.5^{km}. Le point le plus rapproché de la rive est à 1.0^{km} de la côte, à moitié chemin entre Yvoire et Rovéréaz ; le point le plus éloigné est à 2.75^{km} devant Yvoire, dans la direction de Dully. [2] La détermination plus précise des limites de ces omblières mériterait d'être reprise, malgré les difficultés de l'opération.

La profondeur d'eau sur les omblières est de 60^{m} environ ; aux points extrêmes l'on trouve 55 et 70^{m}.

La moraine sous-lacustre d'Yvoire est située près de la barre de Promenthoux, mais elle n'est pas sur le col même de cette passe ; la distance qui l'en sépare est de 3^{km} environ, à l'est. Je préciserai cette position : en passant du Grand-lac dans le Petit-lac, c'est sur le talus de gauche de la vallée, à 3^{km} avant d'arriver au sommet du col. Sur la passe même il n'y en a pas, que nous le sachions.

De ces faits, il résulte que, près de la barre de Promenthoux, le plafond, ou plutôt les talus du Grand-lac présentent, sur une surface assez étendue, l'apparition de blocs erratiques, de cailloux et de sables d'origine alpine, non submergés par l'alluvion lacustre moderne ; que celle-ci existe cependant entre les pierres et les amas de graviers, assez pour remplir nos dragues ; que les pierres sont à nu dans l'eau puisqu'elles sont revêtues par un tapis de mousses. Cette moraine sous-

(1) Procès-verbaux de la S. V. S. N. Bull. XXVI, XV. 1890. Arch. Genève, XXIII, 462, 1890.

(2) J'ai figuré la position de ce losange dans ma carte du lac au 1 : 100 000e qui accompagne ce volume. On trouvera d'autre part marqué sur la carte partielle de la barre de Promenthoux, fig. 14, page 57, près du bord oriental de la carte, à 1250^{m} au nord de la pointe d'Yvoire l'angle du losange formé par les moraines sous-lacustres ; il est désigné par le mot *Omblière*.

lacustre est la station favorite de l'omble-chevalier qui y vient établir ses frayères.

Nous connaissons sur les côtes du lac les moraines littorales ; j'en ai cité plusieurs ; il y en a une fort belle le long de la pointe d'Yvoire, d'Yvoire aux ruines de Rovéréaz. L'érosion progressive des côtes a lavé les matériaux terreux et argileux, et blocs et cailloux sont restés sur le sol, à la profondeur limite de l'action des vagues. Mais c'est la première fois que nous rencontrons dans la région profonde du Léman, en dehors de la région littorale d'érosion active, une moraine qui ne soit pas ensevelie sous l'alluvion lacustre moderne. Constamment il se dépose sur le sol une alluvion minérale et organique, provenant de l'eau trouble des affluents, de l'eau salie par les matériaux de la rive attaquée par les vagues, et des organismes animaux et végétaux vivants dans le lac ; cette alluvion se dépose également partout dans la profondeur, et nous la supposions recouvrir de ses couches, probablement fort épaisses, tous les accidents du sol primitif. Comment en ce point spécial la moraine a-t-elle surnagé au-dessus de l'empâtement général ?

Est-ce que nous nous serions trompés en attribuant à l'alluvion lacustre impalpable une action suffisante pour recouvrir d'une couche uniforme tous les détails des murailles du lac ? Je ne le crois pas ; si j'avais ainsi fait erreur, le sol morainique serait à nu dans toute la région du lac qui n'est pas envahie par les alluvions grossières et par l'alluvion fluviatile impalpable, c'est-à-dire la plus grande partie du plafond et des talus du lac ; nous l'aurions certainement reconnu dans nos dragages ; il n'aurait en tous cas pas échappé au sondeur à coupe d'Hörnlimann et des agents de M. Delebecque qui, en faisant les levers de la carte hydrographique, ont couvert toute l'étendue du lac d'un réseau serré de dragages verticaux ; les pêcheurs du reste en auraient reconnu des traces dans leurs filets. Non, je n'ai pas fait une grossière erreur ; il y a là quelque chose de tout à fait spécial : tandis que partout ailleurs l'alluvion lacustre empâte toutes les inégalités du sous-sol, sur la moraine sous-lacustre d'Yvoire son dépôt a été presque nul.

J'ai d'abord pensé à expliquer les omblières d'Yvoire par l'existence d'un affluent sous-lacustre qui sourdrait en ce point sur le sol du lac. Cette interprétation répondrait fort bien à quelques particularités du phénomène : à l'apparition sur le fond de cailloux et de graviers dégagés de l'alluvion lacustre, à la présence sur les roches d'une mousse dont

les analogues se plaisent dans les eaux courantes, aux bizarres érosions des galets calcaires dont je vais parler, enfin à l'abondance du poisson qui se rassemble en ce point ; on dit que les poissons recherchent avec passion les localités où l'eau froide d'une source entre dans le lac. Mais l'étude plus attentive de la région m'a fait écarter cette supposition.

En effet, les omblières d'Yvoire ne présentent aucune dépression du sol ; la carte hydrographique ne montre ni entonnoir, ni creux, ni déviation quelconque des courbes isobathes. Il n'y a rien d'analogue à ce que nous trouvons dans le seul exemple jusqu'à présent bien authentique, à ma connaissance, d'un affluent sous-lacustre, le célèbre *Boubioz* du lac d'Annecy. Les recherches fructueuses de M. A. Delebecque en 1890 et 1891 ont montré en effet que le Boubioz est un affluent sous-lacustre ; il l'a prouvé en constatant le 25 février 1891 par un sondage thermométrique une température de l'eau de 11.8° dans le fond de l'entonnoir, tandis que le lac d'Annecy était gelé et avait par conséquent les eaux à 4° au plus dans le fond, et 0° à la surface du lac. (¹) D'une autre part la carte hydrographique du lac (²) fait voir que le Boubioz est un vaste entonnoir de plus de 50ᵐ de profondeur, creusé dans le talus du lac en un point où ce talus est déjà sous 30ᵐ d'eau. La sonde est descendue dans le Boubioz à 81ᵐ soit à 16ᵐ plus bas que le plafond du lac d'Annecy. (³) Donc un affluent sous-lacustre, venant sourdre sur les talus du lac, empêche le dépôt de l'alluvion, et les griffons de la source restent au fond d'un entonnoir dont les dimensions peuvent être considérables. (⁴) Nous n'avons rien de semblable à Yvoire ; donc les omblières d'Yvoire ne sont pas le point d'émergence d'une source.

Nous arrivons à la même conclusion par les sondages thermométriques que nous avons effectués sur place, soit M. Delebecque soit moi-même ; nous n'avons pas trouvé de différence de température entre l'eau qui gît sur la moraine sous-lacustre et les eaux avoisinantes, à même profondeur. Il est vrai que cet argument est peu démonstratif,

(1) *A. Delebecque* et *L. Legay*. Sur la découverte d'une source au fond du lac d'Annecy. C. R. Acad. sc. Paris, 20 avril 1891.

(2) Carte hydrographique du lac d'Annecy par *Delebecque* et *Legay*, ingénieurs des Ponts et chaussées.

(3) Arch. Genève, XXIV, 404, 1890.

(4) Avec une sonde très sensible, j'ai reconnu le 29 septembre 1890 qu'au fond de l'entonnoir du Boubioz il y a une cheminée rocheuse à parois presque verticales.

car sa signification est négative, et il serait réfuté par un fait positif qui viendrait à être constaté.

Un troisième argument auquel j'attachais une grande valeur est l'absence de brouillards locaux apparaissant en temps froid sur les omblières d'Yvoire ; jamais les riverains n'en ont observé. J'admettais que l'eau d'une source, probablement plus chaude que le lac en hiver, s'élèverait jusqu'à la surface, s'y étalerait en nappe tiède et causerait le développement de brouillards. Ce mode de preuve a perdu beaucoup de sa signification depuis que la nature d'affluent du Boubioz a été démontrée, car dans ce point, non plus, les pêcheurs n'ont jamais noté d'apparition extraordinaire de brume. D'après cette expérience il semblerait qu'une source chaude qui sourd dans le lac à 80^{m} de profondeur n'arrive pas à la surface avec une chaleur suffisante pour provoquer la formation d'un brouillard. (1)

Quoi qu'il en soit, jusqu'à nouveaux faits, j'écarte pour l'interprétation de la moraine sous-lacustre d'Yvoire l'hypothèse d'une source affluente, et je dois chercher une autre explication de la faible épaisseur ou de l'épaisseur nulle du dépôt de l'alluvion lacustre dans cette localité.

J'attribue cette faible épaisseur des couches d'alluvion en ce point à l'action des courants. S'il est une région du Léman où les courants doivent être puissants, c'est dans ce détroit de Promenthoux qui rétrécit subitement la section transversale du lac, aussi bien dans sa largeur que dans sa profondeur, courants divers dus au transport de l'eau dans la direction de l'émissaire, dus aux dénivellations continues, aux seiches, aux vents, etc. Ces courants que nous étudierons dans un autre chapitre ont certainement dans cette localité un maximum d'intensité.

Une course dans une haute vallée du Jura m'a appris comment les choses se passent au fond du lac. A la fin de janvier 1886, la vallée du Locle était enneigée depuis le mois d'octobre. Les chutes successives de neige avaient recouvert le sol d'une couche que l'on estimait à 50 ou 60^{cm} en moyenne. Et cependant toutes les arêtes, les crêtes, les pointes du terrain étaient à nu, et le sol ou le gazon y apparaissaient à découvert. C'était l'effet du vent qui avait balayé la neige poussié-

(1) Pendant la congélation du lac d'Annecy en février 1891, M. Delebecque a constaté que sur le Boubioz la glace avait la même épaisseur que sur le reste du lac. C'est une confirmation du fait allégué.

reuse, l'avait accumulée dans les dépressions et sur les parties planes, l'avait enlevée de toute éminence ou partie saillante. Il en est de même au fond du lac. L'alluvion y tombe sous la forme de flocons, comme la neige; elle s'étend en tapis continu ; mais, comme la neige est balayée par les vents, l'alluvion est enlevée par les courants, les parties saillantes sont mises à nu, et c'est ainsi que la moraine sous-lacustre d'Yvoire apparaît, non recouverte par l'alluvion lacustre moderne.

Ma comparaison pèche peut-être en un point. La neige poussiéreuse est balayée par les vents, même si elle repose en couche sur le sol. En est-il de même de l'alluvion lacustre? Y a-t-il érosion par les courants sur le fond du lac? Ce n'est pas certain. La vase argileuse une fois assise en couche compacte est très tenace; elle ne se laisserait pas facilement entamer par des courants nécessairement peu ardents. Elle n'est crêmeuse que dans sa couche tout à fait superficielle, riche en détritus organiques et non encore travaillée par le jeu des animaux qui la perforent et des fermentations qui la transforment; et encore n'est-elle crêmeuse que là où elle n'est pas recouverte par la couche protectrice du feutre organique vivant. C'est donc surtout à l'entraînement, par l'action des courants, des flocons d'alluvion pendant leur chute, tout au plus à leur soulèvement au moment où ils viennent de se poser sur le sol avant qu'ils soient définitivement incorporés à l'argile lacustre, plutôt qu'à l'érosion proprement dite des couches d'alluvion marneuse, que je crois pouvoir attribuer la faible épaisseur du dépôt de vase dans la moraine sous-lacustre d'Yvoire.

Tant que j'ai pû croire, sur la foi de sondages bathymétriques insuffisants, que la moraine d'Yvoire était sur le col même de la passe de Promenthoux, j'ai dû relier à cette moraine l'existence de la barre qui sépare le Petit-lac du Grand-lac. ([1]) Depuis qu'un lever hydrographique plus exact nous a montré que le col de la barre est assez éloigné de la moraine, je suis obligé de me corriger et de séparer les deux phénomènes. La barre de Promenthoux est indépendante de la moraine sous-lacustre d'Yvoire.

Je décrirai dans un autre chapitre, où je traiterai des sculptures des galets du lac, la singulière érosion que présentent certains cailloux de la moraine d'Yvoire; je me borne à l'indiquer ici. Les pierres calcai-

Voyez *F.-A. Forel*. La barre d'Yvoire, loc. cit.

res, calcaire alpin gris, noir ou bleuâtre, sont profondément érodées ; des creux en général hémisphériques ou sphéroïdaux, de 5, à 10, à 15^{mm} de diamètre, pénètrent dans la masse pierreuse et, quelquefois même, la traversent de part en part. Ces creux se développent sur la face inférieure de la pierre, celle qui est enfouie dans l'alluvion lacustre, et se prolongent de bas en haut. Je les attribue à l'action de l'acide carbonique qui se dégage dans le sol. [1]

VIII. **Les éboulements du mont.**

Le talus du mont est relativement très incliné. Sa pente représente la limite extrême de stabilité des matériaux meubles s'éboulant dans l'eau ; sitôt qu'une surcharge arrive sur le bord antérieur de la beine, soit par apport de matériaux charriés par le courant de retour des vagues, soit par transport de l'alluvion torrentielle, soit par des constructions humaines, il peut se produire un éboulement ou glissement de terrain. Cet accident est assez fréquent, et quoiqu'il échappe le plus souvent à l'observation, je puis en citer quelques exemples :

La pointe d'alluvion sur laquelle est bâti le village de St-Prex s'avance assez en avant dans le lac pour que sa grève arrive presque au haut du grand talus ; la beine y est très étroite, presque nulle. Le 23 août 1875, par un lac calme, les pêcheurs virent tout-à-coup l'eau bouillonner en un point déterminé, des bulles de gaz arriver à la surface de l'eau, l'eau se salir et se charger de morceaux de bois, de débris organiques, de poussières. Lorsque l'eau fut éclaircie, ils constatèrent un éboulement local ; sur une largeur d'une dizaine de mètres, le revêtement vaseux du sol avait glissé le long du talus et était descendu au fond du lac.

Le même phénomène est très fréquent à l'extrémité d'une pointe sous-lacustre, un aran, [2] que forme la beine au-devant du môle d'Ouchy ; des coulées analogues à celles que je viens de décrire à St-Prex y sont observées chaque année ; au 15 juin 1881, les pêcheurs en avaient déjà vu trois depuis le commencement de l'hiver.

(1) Bull. S. V. S. N. XXVI, XV, 1890. — Arch. Genève XXIII 462, 1890.
(2) Voir p 83.

Il en est de même à Vevey, devant le quai de l'Aile, où les alluvions de la Veveyse, occasionnent des coulées, observées à diverses reprises par les pêcheurs.

Il en est de même au Trait de la baye de Montreux, d'après le récit que me fait M. Hans Schardt, dans la région où a eu lieu l'éboulement du quai du Kursaal; un pêcheur lui a dit avoir assisté à de telles coulées.

Dans ces divers cas, la rupture d'équilibre est due à la surcharge causée par l'alluvion naturelle du lac; l'action de l'homme n'y est intervenue en rien. Il n'en est pas de même dans les exemples suivants où des constructions... osons-nous dire imprudentes ? ont trop chargé la partie supérieure des couches à la limite de la pente naturelle de l'éboulement.

Nous venons de dire que les alluvions de la Veveyse descendent sous forme de coulées, très innocentes du reste, sur les talus du cône submergé du torrent. Mais l'histoire de Vevey nous a conservé le souvenir d'événements beaucoup plus graves qui ont fortement endommagé les quais et constructions de la ville.

Le 8 juin 1785, à 4 h. du matin, par un temps calme, le corps de logis d'une des maisons de la rue du Sauveur (rue du Lac actuelle), qui faisait saillie sur le lac, s'effondra dans le lac avec tout le terrain sur lequel elle était bâtie. ([1]) Le 30 novembre de la même année, après une forte vaudaire, les façades de deux maisons de la même rue s'effondrèrent, entraînées par l'éboulement du sol qui les portait. ([2]) En 1809, une troisième catastrophe du même genre eut lieu, en continuant sur le côté oriental la coulée formée par les précédents éboulements.

Ces accidents étaient à peu près oubliés, lorsque en 1872 on décida de continuer, dans ce quartier de la ville, le beau quai qui s'arrêtait à la place de l'Ancien port. De 1873 à 1875, sous la direction de M. l'ingénieur E. Cuénod, l'on construisit, avec des précautions qui semblaient suffisantes, un quai dont les murs, bâtis sur pilotis, réunissaient l'ancien quai à la Grande-Place de Vevey. Ce superbe travail était terminé depuis dix-huit mois et faisait le bonheur et la gloire de Vevey, lorsque tout à coup, le 11 mai 1877, toute la partie occidentale du nouveau

([1]) Almanach de Berne et Vevey pour 1786, Vevey 1785.

([2]) *Levade,* Dictionnaire historique du canton de Vaud, article Vevey.

quai sur une longueur de 106^m s'effondra dans le lac. Cet éboulement a eu pour limites précises le bord de la coulée du premier effondrement de 1785.

De cette manière, la couche superficielle du talus, depuis le milieu de la Grande-Place jusqu'à la place de l'Ancien-Port, s'est successivement éboulée et est descendue au fond du lac :

la portion	occidentale	dans la	catastrophe	de 1877
»	centrale	»	»	de 1785
»	orientale	»	»	de 1809

Il est probable que les couches très inclinées de l'alluvion de la Veveyse, analogues à celles que nous avons signalées page 80, présentent des alternances de consistances diverses, et que, plongeant sous l'angle limite de stabilité, la moindre surcharge suffit à détruire l'état d'équilibre.

Pour ce qui regarde cette alternance de couches de consistances différentes, elle a été constatée à Vevey pendant l'opération de l'enfoncement des pilotis du nouveau quai en 1873. D'après le rapport de M. V. Chevalley, inspecteur des travaux de la ville de Vevey, qui dirigeait l'opération du pilotage, on aurait successivement traversé les couches suivantes :

a Une couche tendre.

b Une couche plus dure, de consistance de la terre glaise.

c Une couche tendre.

d Une couche dure, analogue à la couche *b*.

Au moment de l'éboulement du 11 mai 1877, bon nombre des pilotis ont été brisés ; puis, le glissement du sol continuant, l'extrémité inférieure des pilotis s'est trouvée dégagée, et la plupart de ces bois sont venus flotter à la surface de l'eau. L'inspection des culots de fer des pilotis nous a montré des graviers de l'alluvion de la Veveyse attachés au métal par un ciment d'oxyde. Cela donne à penser que la couche *d*, dans laquelle se sont arrêtées ces pointes de pieu, était composée de graviers, ainsi que la couche *b* qui avait la même consistance. Quant à la couche *c*, qui avait la même mollesse que la couche *a*, ce devait être de l'alluvion vaseuse du lac ou du sable fin.

Il est facile de comprendre comment des couches de consistance diverse, inclinées sur un talus de 50 $^0/_0$ à la limite de la pente naturelle de l'éboulement des matériaux meubles dans les eaux, surchargées à leur partie supérieure par un quai pesant, aient pu s'effondrer

dans le lac. Ce qui est étonnant, c'est que des faits analogues ne se reproduisent pas plus fréquemment, avec la manie qui obsède les riverains de construire partout des quais rectilignes et monumentaux sur les bords autrefois si pittoresques du lac.

A côté des effondrements du quai de Vevey, je n'ai à citer sur le Léman que deux événements à peu près identiques :

L'éboulement d'un petit quai de quelque 20^{m} de longueur, à l'orient du débarcadère de Clarens ; il avait été construit au printemps, il s'est effondré en bloc dans le lac le 12 septembre 1883.

L'éboulement du quai du Kursaal de Montreux, le 19 mai 1891. A l'heure même où les hôtes illustres, que l'Etat de Vaud avait conviés pour fêter la transformation de l'antique Académie de Lausanne en Université, écoutaient dans les salons du casino les paroles enflammées de notre vénéré maître le professeur Charles Secrétan, à quelques pas de là un quai construit récemment s'écroulait dans le lac sur une longueur de cinquante mètres. Murs du quai, enrochements, pilotis et radiers qui le soutenaient, remblai qui le remplissait, murailles anciennes et récentes des jardins, partie du sol de ces jardins avec les pavillons qui les ornaient, façade d'une antique maison rurale, bâtie, elle au moins, sur la terre ferme, tout descendait successivement dans le lac et s'éboulait jusqu'au pied du talus. La pente moyenne de la rampe sous-lacustre est en ce point de 50 $^{0}/_{0}$; elle s'adoucit un peu à sa jonction avec le plafond du lac situé à une profondeur de 105^{m}. Le quai avait été achevé au printemps de 1891 ; il n'avait guère que six semaines d'âge. Au moment de l'accident, les vagues d'une violente vaudaire battaient les murailles, et les averses répétées d'une pluie impitoyable avaient imbibé le sous-sol, et surchargé d'un poids d'eau surajouté les terres encore mal assises. Telles ont été les circonstances déterminantes de l'accident ; nous pouvons ajouter que ces circonstances ont été heureuses, car cette inclémence du temps avait empêché l'arrêt projeté des bateaux de fête au débarcadère du Kursaal ; si le programme avait été suivi, une foule de milliers de spectateurs aurait été massée sur ce même quai. Leur poids aurait peut-être amené la rupture d'un équilibre certainement très instable, et une catastrophe épouvantable aurait étendu son voile de deuil sur la joyeuse fête que nous célébrions. Il n'y a eu, Dieu merci ! aucun accident de personnes.

Dans l'effondrement du quai de Montreux, il faut noter un détail

intéressant. La partie qui s'est éboulée était la seule qui fût pilotée, et l'éboulement s'est arrêté exactement aux limites du pilotage. L'ébranlement du sol par le battage des pieux pourrait-il être quelque chose dans les causes déterminantes de la catastrophe? — Du reste les pilotis du quai de Montreux n'ont pas été brisés par l'éboulement comme ceux de Vevey, et l'effondrement a certainement emporté du premier coup toute la couche dans laquelle ces pieux étaient implantés.

M. le Dr H. Schardt a fait, par un réseau de sondages et de dragages très serrés, une étude intéressante de cet éboulement sous-lacustre. Il a constaté que la zône d'arrachement s'étend jusqu'à 100 et 120m de la rive; au-dessous, une légère intermescence, qu'il a suivie juqu'à 100m de profondeur et à 300m du rivage, signale l'aire de déjection de l'effondrement. Les dragages de M. Schardt lui ont permis de reconnaître la coulée de graviers jusqu'à plus de 500m de la rive, jusque sur le plafond du lac qui est à ce point à 105m de profondeur. (1)

POST-SCRIPTUM. — *Carte des sondages du Léman.*

Au moment où se termine l'impression de cette partie de mon livre consacrée à l'étude du relief du lac, je reçois une épreuve de la carte hydrographique au 1 : 50 000e, publiée en tirage photo-lithographique par les soins du bureau topographique fédéral. Je l'ai déjà annoncée aux pages 33 et 38, mais après l'avoir étudiée, je dois profiter de l'occasion qui me reste ouverte, pour remercier le colonel Lochmann de la publication de cette carte, offerte à tous ceux qui s'intéressent au lac. C'est une réduction de la grande carte originale au 1 : 25 000e dressée d'après les levers directs. Elle donne tous les détails du relief qui seront figurés dans les feuilles de l'atlas Siegfried; mais elle a sur celles-ci l'avantage de les présenter sur une seule feuille (de 1.45m sur 0.70m) au lieu d'être découpée en 22 feuilles différentes. Mais ce qui distingue cette carte et lui donne une supériorité réelle sur toute carte jusqu'ici publiée, c'est que, conformément à ma proposition (voyez page 39), elle indique par un point tous les coups de sonde levés par les hydrographes; la cote obtenue par le sondage n'est, il est vrai, pas inscrite, mais la profondeur réelle peut toujours en être déduite par interpolation entre les courbes isohypses. L'étude du relief sera gran-

(1) *H. Schardt. In litt.* 2 août 1891.

dement facilitée par la connaissance des points sondés ; on saura la confiance que l'on peut attribuer à chaque détail figuré, en raison du nombre et de la position des sondages qui l'assurent.

Le dessin est très suffisamment net ; l'adjonction des points ne charge pas trop la carte ; les chiffres se lisent facilement ; dans certaines parties très abruptes quelques courbes ont dû être interrompues pour éviter l'encrassement par l'encre lors du tirage, mais cela ne gêne guère l'appréciation du relief à l'œil.

J'estime que cette carte (1) est parfaitement suffisante pour le géographe, le géologue, le naturaliste, qui, grâce à elle, n'auront pas besoin d'avoir recours aux minutes originales pour leurs études spéciales ; elle satisfera tous ceux qui voudront vérifier les faits que j'ai exposés dans les pages précédentes, et tous ceux qui voudront pousser plus loin que je n'ai pu la développer l'étude du relief de notre lac.

Le seul reproche que j'aie à lui faire, c'est d'avoir figuré les blocs erratiques de la beine ; ils y sont marqués par un point, comme les coups de sonde, et rien ne les distingue de ces derniers que leur groupement en moraines littorales, à disposition plus serrée et plus irrégulière que les réseaux de points de sondage. Il eût mieux valu les laisser de côté, si l'on ne pouvait leur trouver un signe spécial. C'est du reste seulement dans les eaux suisses de St-Sulpice à Hermance qu'ils ont été dessinés ; ils n'ont pas été rapportés dans la partie orientale du lac, pas plus que dans les eaux savoyardes.

(1) Cette carte est en vente au prix de 12 fr. dans les dépôts de cartes fédérales, librairie Benda, à Lausanne, librairie Georg, à Genève, etc. Elle porte le titre : *Carte des sondages du lac Léman.*

TROISIÈME PARTIE

GÉOLOGIE

Dans cette partie de notre livre, nous traiterons des questions géologiques qui intéressent le lac Léman, et pour cela, après avoir fait une brève description du pays où est logé le lac et donné un court résumé de l'histoire géologique de notre pays, nous chercherons quelles sont les strates anciennes qui forment les murailles du lac ; cela nous fournira une date reculée pour le début probable du creusement du bassin. Puis, nous étudierons les terrains modernes qui revêtent la vallée, cela nous donnera une date rapprochée pour la fin du creusement. Enfin, j'essaierai d'une théorie du Léman, le chapitre, difficile entre tous, qui m'a préoccupé depuis le jour où j'ai réfléchi sur les problèmes généraux de l'histoire naturelle de notre lac, et pour lequel je ne suis arrivé que tout récemment à une solution qui me paraît satisfaisante. Cette solution est-elle vraie ? La critique scientifique de nos contemporains et de nos successeurs la jugera.

I. **Le pays du Léman.**

Avant d'aborder l'étude du sol dont les assises forment le bassin du lac, il semble nécessaire de décrire le relief de la contrée dans laquelle est logé ce bassin, de retracer les grands traits du pays du Léman. Cette tâche n'est pas facile. Non pas que le thème ne soit beau, et riche

en développements. Quel tableau de paysage serait plus séduisant que cette

« heureuse patrie,
« Où la nature assemble ses trésors. »

Qui ne serait joyeux de célébrer les attraits de ces lieux aimés et charmants entre tous ? Mais la difficulté pour l'auteur, serait de trouver la juste mesure, de répondre à ce que ses divers lecteurs ont le droit de réclamer. Pour ceux qui connaissent le Léman, toute description serait insuffisante à représenter à satisfaction le paysage merveilleux qui entoure le plus beau des lacs ; pour ceux qui ne le connaissent pas, toute description, nécessairement sèche et froide, n'arriverait pas à leur en faire deviner la grandeur et la beauté. Je m'arrête devant ces obstacles et laissant la peinture pittoresque et colorée aux Juste Olivier, (1) aux Louis Vulliemin, (2) aux Eugène Rambert, (3) aux Charles Secrétan, (4) je m'en tiendrai à ce qui est mieux de ma compétence, à la description objective et géographique, que du reste je ferai aussi brève que possible.

Les hautes Alpes pennines sont bordées par une série de chaînes secondaires, les Alpes latérales du nord, (5) plus ou moins parallèles à l'arête principale qui va du Mont-Rose au Mont-Blanc ; au nord-ouest des Alpes, et à peu près parallèlement à elles, court la chaîne du Jura ; entre ces deux massifs de montagnes, s'étale le plateau Suisse. La vallée du Rhône, qui a pris naissance dans le Valais, et a creusé sa large et profonde dépression entre les Alpes bernoises et valaisannes, se courbe à angle droit, à Martigny, pour franchir les Alpes latérales et se dirige vers le nord-ouest, entre les Préalpes vaudoises et les Préalpes valaisannes ; elle y forme ce que nous appelons la plaine du Rhône, largement entaillée entre les cimes qui s'étagent à la suite des dents de Morcles et du Midi. Elle traverse ensuite le plateau suisse et savoyard où elle s'est creusée un ravin profond, et,

(1) Le canton de Vaud. Lausanne, 1837.

(2) Le canton de Vaud. 3e éd. Lausanne, 1885.

(3) *Passim.*

(4) Paysages vaudois, *in Gazette de Lausanne.*

(5) Les *Alpes latérales du nord* comprennent les *Hautes Alpes calcaires* (Diablerets, Morcles, Dent du Midi) et les *Alpes antérieures* ou *Préalpes*, chaînes extérieures aux hautes Alpes calcaires.

après avoir passé à Genève, elle s'échappe par la cluse du Vuache (1) en coupant le Jura, pour gagner les plaines de France et la Méditerranée. Le Léman occupe dans cette vallée toute la partie qui s'étend entre la plaine du Rhône bas-valaisan, et le pays de Genève ; sa partie orientale, le Haut-lac, est enserrée entre les chaînes des Alpes antérieures ; ses parties centrales et occidentales, le Grand-lac et le Petit-lac, sont dans le domaine du plateau mollassique.

La plaine du Rhône, qui forme la partie sud-orientale du pays du Léman, commence à la cluse de St-Maurice et s'étend jusqu'au lac ; c'est une vaste plaine d'alluvion, d'une vingtaine de kilomètres de longueur, de 4 à 5km de largeur, qui descend vers le Léman avec une pente douce de 2 pour mille environ. Cette plaine, qui n'est du reste qu'un fond de vallée, est peu inégalisée ; on y retrouve cependant, suivant les parties, des terres d'alluvion de grande fertilité, les alluvions grossières des torrents latéraux, des marécages et des marais tourbeux. Elle est bordée par les talus des Préalpes vaudoises dont les sommités principales sont Chamossaire, 2118m, et la Tour d'Aï, 2331m, et par ceux des Préalpes valaisannes, le Corbeau, 1995m, le Grammont, 2175m. Les pentes de ces Alpes sont d'inclinaison moyenne, de 25 à 45 $^0/_0$; par places, leur déclivité est bien plus forte. Ainsi, le versant occidental du mont d'Arvel descend vers Villeneuve, avec une inclinaison de 100 $^0/_0$, faisant ainsi un angle de 45° avec l'horizon ; ainsi, la paroi du monticule rocheux de St-Triphon, est verticale, surplombe même par places.

L'on a fait remarquer que, le plus souvent, le talus rocheux vient couper à angle vif la plaine du Rhône, et qu'il n'y a pas à son pied de cailloutis d'éboulement ; l'on en a tiré une preuve de la faible ancienneté du comblement de la plaine du Rhône. Cette observation est juste, mais, si je ne me trompe, elle n'a pas une très grande portée : elle signifie seulement que le relèvement de la plaine est d'activité plus rapide que la formation en talus d'éboulement, des débris arra-

(1) La cluse qui traverse le Jura a été désignée par différents noms : cluse du Fort de l'Ecluse, mais ce nom est compliqué et peu euphonique : cluse de Longeray, d'après un hameau qui y est logé, mais il est trop peu connu ; cluse du Rhône (Schardt), mais ce nom prête à confusion avec les autres cluses creusées par le même fleuve ; cluse de Bellegarde, d'après le nom de la station de chemin de fer, célèbre par les agréments de la douane française, mais Bellegarde est en dehors de la cluse proprement dite. J'adopte le nom de cluse du Vuache, montagne située à l'est du Rhône, et séparée par ce fleuve du Grand-Crédo.

chés par la gelée, la pluie, et en général par les érosions atmosphériques.

Si partant de la plaine du Rhône, nous suivons la côte suisse, nous traversons d'abord le district (1) de Montreux, établi sur les pentes des Préalpes vaudoises, dont le pied est baigné par le Léman; c'est la région fortunée du pays du Léman, la plus pittoresquement découpée, dominée par les cimes si diversifiées de Malatrait 1931m, les Rochers de Naye, 2044m, la dent de Jaman, 1878m, la Cape de Moine 1936m, la mieux abritée contre les vents du nord. C'est pour notre lac ce qu'est la Rivière de Gênes pour la Méditerranée occidentale. Ah! que ce pays devait être beau, avant que la vigne eût remplacé, par les rangées monotones de ses plantes taillées et échalassées, les antiques forêts des chênes et des châtaigniers qui formaient bordure sous la couronne sombre des sapins, avant que les aubergistes l'eussent semé des cubes et des parallélépipèdes rectangulaires de leurs caravansérails envahissants, alors que les sentiers agrestes n'avaient pas été coupés et refoulés par les routes alignées, les rues, les boulevards, les railways et les tramways! Malgré tout ce que l'homme a fait pour le défigurer, il est encore charmant. Que devait-il être au temps jadis?

Le district de Vevey, entre Burier et les monts de Chardonne, étale ses coteaux, ses villes et ses villages, sur les pentes mamelonnées d'un superbe amphithéâtre de roches mollassiques; il est traversé par la Veveyse, rivière torrentueuse dont le vaste bassin d'alimentation explique la puissance dévastatrice, heureusement domptée par l'art de l'ingénieur moderne.

De Chardonne à Lausanne s'étend sur les bords du lac le riche vignoble de La Vaux avec ses beaux villages, ses vignes suspendues en terrasses superposées qui s'élèvent jusqu'aux forêts des Monts de La Vaux. Ce versant, qui regarde le S. S. W., la partie la mieux ensoleillée des rives du Léman, est constitué par l'éboulement de la tranche du plateau molassique du Jorat. Celui-ci, dans sa généralité, ne dépasse guère 700 à 800m. Il est dominé par quelques sommités mousses, le mont Pèlerin, 1077m, la Tour de Gourze, 929m. Le bord occidental de ce plateau est bordé par le ravin de la Venoge. Il est entamé sur le

(1) Par ce terme de district, je n'entends point rappeler les divisions administratives du canton de Vaud; à ce point de vue il n'y a point de district de Montreux, mais un cercle de ce nom.

flanc qui regarde le lac par les ravins de la Lutrive, de la Paudèze, du Flon. Les flancs de La Vaux sont fort inclinés, et ce n'est qu'en élevant les uns sur les autres les escaliers de ses terrasses murées que le vigneron parvient à y faire adhérer quelque peu de terre végétale ; et cependant, dans les parties les plus déclives, au-dessous du signal de Chexbres, dans le précieux vignoble du Désaley, la pente moyenne ne dépasse pas 67 $^0/_0$; elle n'atteint pas 35° au-dessus de l'horizontale.

De l'embouchure du Flon jusqu'à l'Aubonne s'étend le district de Morges, territoire mollassique en pente douce, entaillé par les vallées où se logent la Venoge, la Morge, le Boiron et l'Aubonne ; le plateau du Gros de Vaud est ici coupé par un rebord moins saillant, il est moins élevé et domine de moins près le lac que dans les régions de La Vaux et de La Côte.

Le district de Rolle, qui porte le nom de *La Côte*, par excellence, est remarquable par le plateau de mollasse surmonté d'alluvions anciennes et modernes, qui s'élève à ses points culminants jusqu'à 712^m au signal de Bougy, à 830^m à Burtigny. Les éboulis de ce plateau, coupé en pente abrupte du côté du lac, portent le fertile vignoble de La Côte, orienté dans la direction du sud-sud-est. Ce district s'étend de l'Aubonne à la Promenthouse.

Au sud-ouest de la Promenthouse, de Nyon jusqu'à Genève et au-delà, le plateau de nature mollassique dans ses assises profondes, recouvert d'un fort revêtement de terrains glaciaires et d'alluvions, gracieusement mamelonné en collines arrondies, se relève beaucoup moins et ne dépasse le lac que de quelque 80 à 100 mètres. Il n'est traversé que par un seul ravin notable, celui de la Versoie.

Au-dessus du plateau vaudois, dans la direction du nord-ouest, à 8, 10 et 14^{km} de la rive du lac, l'on voit la noire muraille monotone et régulière du Jura, dont les sommets principaux, le Mont-Tendre, la Dôle, le Colombier, atteignent aux altitudes de 1680 à 1689^m.

Revenons à la plaine du Rhône et suivons la côte de Savoie.

Du Bouveret à la Tour-ronde, côte très abrupte, très accidentée, très pittoresque, en pleine région montagneuse. D'abord les flancs arides du Grammont, 2175^m ; puis le ravin de la Morge de St-Gingolph qui recueille les eaux du Creux de Novel ; puis la paroi presque verticale de Meillerie, avec ses carrières inépuisables de calcaire alpin, qui porte le plateau de Thollon, 1000^m ; plus haut les rochers de Mémise,

1682^{m} et enfin la Dent d'Oche, 2225^{m}, cette reine dans la couronne des montagnes qui forment le panorama du Léman vu de Lausanne ou de Morges.

De la Tour-ronde à la Drance, le lac est bordé au sud par une haute colline, l'énorme moraine latérale de l'ancien glacier du Rhône dont la crête atteint 980^{m} d'altitude vers Bernex, pour ne s'élever guère à plus de 700^{m} à Champange au-dessus d'Amphion. Quelque uniforme que soit cette colline, son opulente végétation, ses cultures si pittoresques, ses splendides châtaigneraies lui donnent un caractère bien autrement agreste que les coteaux de vignes de la rive opposée.

Au ravin de la Drance commence un pays de plateau bas qui s'étend jusqu'à l'Arve et jusqu'à Genève. Inégalisé par quelques collines aux formes arrondies, au milieu desquelles le coteau mollassique de Boisy se relève jusqu'à l'altitude de 735^{m}, ce plateau ne domine le lac que de quelque 50, à 100, à 200^{m}. Il s'étend sur une largeur de 7 à 10^{km} jusqu'au pied des premières Alpes savoyardes, les monts d'Armonnaz, 1407^{m}, et les Voirons, 1486^{m}.

Tel est en quelques lignes le relief du pays dans lequel notre lac Léman est logé.

II. **Résumé d'histoire géologique.**

Comme introduction à la géologie spéciale du Léman, il me paraît utile, pour éviter des répétitions, de résumer en quelques lignes l'histoire géologique générale de notre pays dans les ères secondaire, tertiaire et quaternaire, les seules que nous ayons à considérer ici. Nous pouvons d'autant mieux être plus bref que la géologie de la Suisse est bien connue, grâce aux magnifiques travaux qui font la gloire de nos naturalistes modernes, et qu'elle a été parfaitement exposée dans nombre de publications scientifiques ou populaires, entre autres dans l'excellent livre d'Oswald Heer, le *Monde primitif de la Suisse.*

Prenons cette histoire à la fin de l'ère primaire, et suivons-la d'abord dans les trois subdivisions de l'ère secondaire, périodes triasique, jurassique et crétacée. Pendant les périodes triasique et jurassique, la région des Alpes centrales était déjà partiellement émergée, mais présentait un relief probablement fort peu élevé ; une vaste mer bordée de lagunes la baignait au nord, occupant tout le pays actuel des Préal-

pes, ou des Alpes antérieures, de la plaine suisse et du Jura, mer qui communiquait largement avec l'Océan à travers la Bourgogne et le nord de la France, et qui n'offrait que deux terres fermes, l'une au nord dans les Vosges et la Forêt-Noire, l'autre à l'ouest dans le plateau central de la France. C'est alors que se déposaient dans la mer les puissantes assises de calcaire des Alpes antérieures, et les couches alors horizontales qui devaient plus tard fournir par leurs plissements les chaînes du mont Jura. Pendant la période crétacée, les Alpes se soulèvent un peu plus ; le Jura commence à émerger, et forme une large terre qui réunit les grandes îles vosgiennes et centrales de la France. Cette barrière sépare de l'Océan un bras de mer qui, partant du Dauphiné et de la Savoie, traverse toute la plaine suisse, la Haute-Bavière, et va se continuer en passant à Vienne en Autriche, avec la vaste mer de la Hongrie. Dans cette mer, se forment les calcaires néocomiens des flancs du Jura et des Préalpes.

A l'ère secondaire succède l'ère tertiaire avec ses trois étages : ceux des périodes éocène, miocène, pliocène.

La période éocène montre encore la plaine suisse occupée par la mer (?), le Jura assez émergé pour ne plus recevoir de dépôts marins; les Préalpes, au contraire, sont parcourues par de nombreux bras de mer qui y déposent les couches feuilletées du flysch.

Pendant la période miocène, les Alpes se soulèvent, se plissent en nombreuses chaînes parallèles, et émergent hors de la mer; le Jura reste exondé en partie, et la mer de la plaine suisse dépose les assises considérables de la mollasse ; ici, à l'état de marne et de grès fin, dans la partie centrale du bras de mer, là à l'état de poudingues et de nagelfluh, à l'entrée des vallées des Alpes qui apportent une riche alluvion de galets et de cailloux roulés. La même répartition des alluvions que nous avons décrite dans le Léman actuel, nous pourrions la retrouver, si c'était notre affaire, dans les dépôts miocènes ; la mer et les grands lacs d'eau douce étendus entre les Alpes et le Jura y jouaient, dans une plus vaste proportion, le même rôle de réservoirs que nos petits lacs subalpins modernes. La mer miocène est peu profonde ; elle s'est à plusieurs reprises assez amoindrie pour que ses eaux devinssent saumâtres et même douces, et alors se sont déposées les couches de l'aquitanien, du langhien et de l'œningien.

Pendant la période pliocène, la contrée toute entière se soulève, probablement plus fortement du côté des Alpes que du côté du Jura,

les Préalpes achèvent de se plisser, la mer se retire successivement dans la vallée du Rhône jusqu'à Lyon, jusqu'à Valence, Avignon et Beaucaire. Ce n'est pas à nous de prendre parti dans les discussions encore pendantes au sujet de l'époque pliocène et de ses relations avec l'époque glaciaire. Le pliocène doit-il être intercalé entre le miocène et le glaciaire ? Le glaciaire n'est-il qu'un faciès alpin du pliocène des plaines ? A d'autres d'en décider. Constatons simplement ici que les terrains pliocènes proprement dits ne sont pas représentés, ou du moins pas connus dans les régions alpines et subalpines septentrionales.

Arrive enfin l'ère quaternaire avec son histoire relativement moderne. A son début, elle présente en Suisse un épisode très étrange et d'une importance capitale pour le développement ultérieur du pays. Par des causes encore mal définies, les glaciers des Alpes prennent une extension considérable ; ils envahissent les vallées, débordent dans la plaine suisse, la remplissent, et viennent butter contre le Jura ; ils s'épaississent, atteignent un volume énorme qui leur donne une profondeur de plus de mille mètres de glace ; ils débordent de chaque côté, le glacier du Rhône allant au nord se déverser du côté de Soleure ; au sud, franchissant la cluse du Vuache après s'être accolé le glacier de l'Arve, il recueille les glaciers des Alpes savoyardes et pousse ses moraines frontales jusqu'à Lyon. Pendant cette époque, dont la durée nous est inconnue, la Suisse a dû ressembler aux terres polaires actuelles, enfouie qu'elle était sous un énorme culot d'Inlandsis d'où émergeaient les plus hautes cimes, analogues aux Nunataks du Groenland. Sous cette énorme masse de glace, le sol a subi des déformations importantes, par l'érosion glaciaire qui émoussait les saillies, par les dépôts considérables des moraines profondes qui ont rempli les dépressions. Puis les glaciers ont fondu : ils se sont dissociés sur place et se sont transformés en eau, en laissant sur le sol les moraines médianes qu'ils avaient charriées sur leur dos. Alors a commencé la période actuelle où la terre avait pris le relief et les altitudes que nous constatons aujourd'hui.

Quelle a été l'histoire du Léman pendant ce développement des âges antiques et modernes ? C'est ce que nous allons rechercher en consultant les documents géologiques.

III. **Les murailles du bassin du Léman.**

Je désigne sous cette appellation de murailles de la vallée, les couches anciennes dans lesquelles est creusé le bassin du Léman, les roches en place qui ont été attaquées, disloquées, érodées ou enlevées pour laisser l'excavation où le lac est logé; je réserve le terme de revêtement superficiel pour les couches relativement récentes qui se sont déposées sur les murailles depuis que le bassin a été creusé, qui se sont modelées sur la charpente primitive, et en ont plus ou moins déformé les contours.

Les murailles de la vallée du Léman sont constituées par des terrains secondaires et tertiaires; nulle part les terrains primaires n'y sont représentés. On peut y distinguer deux formations très différentes : la région alpine et la région mollassique.

Précisons ce que nous avons dit de la géographie du pays pour l'appliquer à sa géologie. La grande chaîne des Alpes pennines, entre le Mont-Blanc et le Mont-Rose, est une muraille presque continue dirigée du W.-S.-W. au E.-N.-E. Elle est bordée au nord-ouest par une large vallée longitudinale, la grande vallée du Valais qui se continue par le col de la Forclaz et le col de Balme, jusqu'à la vallée de Chamonix. Au-delà de cette vallée, une série de plissements puissants forment les chaînes des Alpes vaudoise est chablaisiennes, ce qu'on appelle les Préalpes, ou Alpes antérieures, fortement repliées, quelquefois même déjetées, considérablement érodées, allant en décroissant d'importance depuis l'arête principale de Morcles-la Dent du Midi, jusqu'au Moléson-Dent d'Oche. Ces chaînes, constituées par les assises de roches secondaires et éocènes, sont nombreuses, et malgré quelques failles et déjettements, malgré les déformations d'une érosion compliquée, elles montrent assez bien, par l'alternance des voûtes anticlinales et des plafonds synclinaux, une suite de plis parfaitement reconnaissables. Sur l'autre bord de la plaine suisse, le Jura forme de son côté une série de plissements parallèles des terrains secondaires; leurs arêtes sont dirigées un peu moins obliquement au méridien que les Alpes pennines, à peu près exactement S.-W.-N.-E. Ces plis sont les plus relevés dans la chaîne qui borde la plaine suisse; les sommets principaux en sont : le Reculet, la Dôle, le Mont-Tendre. Entre les Préalpes et le Jura, s'étend

la plaine suisse (ou plateau suisse, suivant les intérêts géographiques en jeu), (¹) formée d'assises miocènes, à peu près horizontales dans leur centre, légèrement relevées sur les flancs du Jura, plus fortement travaillées par une série de plis anticlinaux et de failles du côté des Alpes. Le lac Léman est creusé dans la partie externe des Préalpes et au milieu de la plaine miocène.

Les Préalpes sont coupées perpendiculairement à leurs chaînes par une large et profonde vallée, la cluse du Bas-Valais qui, commençant à Martigny, passe à St-Maurice, se continue dans la plaine du Rhône, et le Haut-lac Léman. Des deux côtés de cette cluse, les chaînes des Préalpes montrent sensiblement la même structure, et il est facile d'y reconnaître la continuation des mêmes plis. Ces plis sont nombreux et compliqués, difficiles à débrouiller. La carte géologique suisse, feuille XVII de l'Atlas au 100 000e, en a fait une étude intéressante, et les auteurs du texte explicatif, MM. E. Renevier, E. Favre, et H. Schardt, sont arrivés à démêler d'une manière très satisfaisante cette structure si complexe. (²)

Sans entrer trop avant dans l'étude géologique de cette contrée, je me bornerai à ce qui est nécessaire à la théorie du lac, et je constaterai :

a Qu'une coupe transversale aux chaînes des Préalpes montre une série nombreuse de plis avec alternance de voûtes anticlinales et de plafonds synclinaux.

b Que ces plis ont leurs arêtes parallèles à la grande chaîne des Alpes Pennines, à la vallée longitudinale du Valais ou à la chaîne des Alpes bernoises, toutes étendues du W.-S.-W au E.-N.-E.

c Que la vallée du Rhône, de Martigny au Léman, y compris une notable partie du lac, tout le Haut-lac, est une cluse.

Pour la démonstration du premier point, à savoir que la formation des Préalpes est une série de plis à convexité alternative, j'analyserai la figure 5 de la pl. XVII du texte explicatif de la feuille XVII de la carte géologique suisse donnant la coupe générale de la paroi droite

(¹) Si nous considérons la Suisse seule, la région qui s'étend entre les Alpes et le Jura est une plaine ; si nous l'envisageons comme partie du continent européen, c'est un plateau.

(²) Matériaux pour la carte géologique suisse, XXII, I. Les Préalpes de Vaud et du Chablais par *E. Favre* et *H. Schardt*, avec atlas. Berne 1887. — XVI. Monographie des Hautes-Alpes vaudoises, par *E. Renevier*. Berne 1890.

de la vallée du bas Rhône, de Vevey à Aigle. Toute cette région est puissamment érodée ; les sommets des voûtes se trouvent souvent au fond des vallées ; les plafonds synclinaux représentent souvent des sommets de montagnes; les reliefs sont tellement compliqués qu'ils n'indiquent presque nulle part la position originale des replis.

En quittant la mollasse miocène de la baye de Clarens qui plonge dans la direction des Alpes, on trouve à Brent et Corneaux deux bandes de flysch (éocène) entourant une bande de néocomien et formant une première voûte déjetée. Cette voûte, qui est la terminaison vers le sud de la chaîne du Niremont, oblique en s'approchant du lac et se retrouve à Charnex, puis à Montreux. Vient ensuite une faille dont la lèvre sud est formée par une large synclinale qui comprend toute la colline de Glion ; ses deux bords sont constitués par les couches rhétiennes portant dans leur milieu des assises liasiques. Le fond de la vallée de la Veraye semble correspondre à une anticlinale laissant percer du trias et du rhétien ; en réalité, il y a entre Tovère près Mont-Fleuri et Sonchaux une masse affaissée de lias et de dogger (jurassique inférieur) qui butte, par des failles de part et d'autre, contre le trias et le rhétien. Un pli synclinal suit du côté alpin de la seconde faille ; il forme l'arête de Naye et Sonchaux et atteint le lac à Grandchamp, entre Chillon et Villeneuve. Au bord du lac, le fond de cette synclinale est formé de couches de jurassique inférieur ; plus haut, en Sonchaux et Naye, elle est remplie par le jurassique supérieur (malm), le néocomien et même le crétacé supérieur. Plus loin, la vallée de la Tinière est ouverte dans le sommet d'une voûte, légèrement déjetée vers la plaine, pénétrant jusqu'au trias (gypse, anhydrite et dolomie). Sa lèvre N.-W. est presque verticale, sa lèvre alpine est moins inclinée et forme le bord d'un bassin synclinal rempli par du flysch et du néocomien ; ce dernier forme encore le bord supérieur des rochers d'Aveneyre et de Malatrait. Puis vient la superbe voûte des Tours d'Aï, déjetée au N.-W., dont le flanc ouest porte le village de Corbeyrier et touche le bord de la vallée à Vers Cort. Aux Tours d'Aï la voûte jurassique est presque fermée, tandis que vers la vallée du Rhône elle s'ouvre largement, mettant à découvert son noyau liasique et triasique entre Luan et Yvorne. Un nouveau pli synclinal succède à cette voûte, du côté alpin ; il est comme accolé contre le flanc S.-E. de celle-ci, et rempli de flysch qui forme le petit plateau de Leysin-Veyge. Le flanc renversé de la synclinale borde du côté alpin la profonde vallée d'érosion de la

Grande-Eau qui met à découvert le lias et le trias dans des situations très compliquées. [1]

Je m'arrête ici. J'en ai donné assez pour bien justifier mon dire que les Alpes vaudoises, là où elles sont coupées par la cluse du bas Valais, sont une série de replis plus ou moins réguliers montrant alternativement des voûtes et des plafonds, à convexité tantôt supérieure, tantôt inférieure, anticlinales et synclinales.

Les mêmes faits se retrouvent sur la rive gauche de la cluse du bas Valais, de la Dent d'Oche à la Dent du Midi. Je n'en donne pas ici l'analyse, renvoyant aux ouvrages spéciaux, en particulier aux Recherches de A. Favre [2] et au texte explicatif de E. Favre et H. Schardt [3] pour les détails des plissements de ces montagnes.

Le deuxième point de ma démonstration est que l'axe des plis est dirigé parallèlement aux Alpes pennines, soit perpendiculairement à la cluse du Valais. On en trouve les preuves dans l'étude de la carte géologique suisse, en particulier de la feuille XVII de l'atlas au 1 : 100000e. L'on y verra que les bandes d'affleurement des divers terrains forment des zones étroites, parallèles les unes aux autres, dont les grands axes sont tous dirigés du S.-W. au N.-E. Le fait est tellement évident que je n'ai pas à en donner l'énumération détaillée.

Ce qui est plus difficile, c'est de retrouver des deux côtés de la cluse du bas Valais la continuation des mêmes replis. La vallée transversale est assez large, 10 à 20km entre les sommets, pour que cela ne soit pas évident au premier coup d'œil. Mais l'étude attentive qu'en ont fait les auteurs de la carte géologique suisse leur a permis d'établir le fait comme incontestable, et MM. Favre et Schardt ont, dans leur tableau des pages 10 et 11 du texte explicatif, [4] admis la continuité suivante d'une rive à l'autre du Rhône bas-valaisan.

Rive gauche.	Rive droite.
Mont de Boisy.	Mont Pélerin.
Voirons.	Pleïades.
Mont d'Armonnaz.	Cubly.

(1) M. le docteur H. Schardt a bien voulu compléter cette description et la corriger en y faisant entrer le résultat de ses études récentes.

(2) *A. Favre.* Recherches géologiques dans la Savoie, etc., Paris 1867.

(3) Loc. cit. à la page 162, note 2.

(4) Matériaux pour la carte géol. suisse, XXII, 1 loc. cit. — M. Schardt a bien voulu compléter ce tableau et le corriger en quelques points d'après ses dernières recherches.

Rive gauche.	Rive droite.
Rochers de Meillerie.	Verreaux.
Plateau de Thollon.	Dent de Jaman.
Rochers de Mémise.	Dent de Hautandon.
Pic Blanchard.	Merdasson.
Pic de Borée.	Mont d'Arvel, Aveneyre.
Dent d'Oche, Grammont,	Agittes, Ruvines.
Cheilon-les-Bovardes.	Tours d'Aï — Famelon.
Dents du Midi.	Dents de Morcles.

Notons cependant, d'après les mêmes auteurs, un fait intéressant : tandis que plus au sud de Chillon les arêtes des plis sont bien parallèles et en continuation directe les unes des autres, au nord de Chillon et sur la côte de Savoie, à partir du Bouveret, ils forment un angle ouvert dont les bords tendent à devenir parallèles à l'axe du lac. Il semblerait que, avant même que les plis des couches se soient accentués, il y aurait eu déjà là la présence d'un golfe ou d'une vallée transversale. Il y a là l'indication probable de l'existence, déjà dans les périodes géologiques anciennes, d'une vallée du Rhône anté-tertiaire.

Le troisième point de ma démonstration, la nature de cluse de la vallée du Bas-Valais, est une conséquence des deux premiers. On appelle cluse une vallée transversale coupant perpendiculairement une ou plusieurs chaînes de montagnes. Que la vallée du bas Valais soit une vallée transversale, c'est ce que la carte géographique montre immédiatement. Cette vallée transversale est tracée non seulement perpendiculairement aux reliefs du sol, mais encore perpendiculairement aussi aux lignes de crête des replis des Préalpes ; c'est ce que nous venons de démontrer. La continuité des plis géologiques des deux côtés de la vallée prouve que ces chaînes de montagnes autrefois entières ont été coupées et séparées. Quelle est l'action qui a pu faire cette coupure ? Nous le discuterons plus loin.

La cluse du Valais s'avance dans le bassin du lac jusqu'à la hauteur de Clarens sur la rive nord, au moins jusqu'à Meillerie sur la rive sud. Là commence le domaine de la mollasse miocène, et le caractère géologique de la vallée change entièrement. La plus grande partie du Léman est creusée dans le miocène. Le miocène ou tertiaire moyen est divisé par les géologues suisses en cinq étages principaux ; je les

énumère de bas en haut en suivant les notes de mon collègue et ami le professeur E. Renevier, de Lausanne.

Miocène inférieur. I. Etage tongrien, mollasse marine de Bâle, Porrentruy et Delémont ; manque dans la région du Léman.

II. Etage aquitanien. Mollasse à lignites. La Vaux, Moulin Monod, Paudèze, mollasse rouge de Vevey. Marne et calcaire fétide de St-Sulpice, Préverenges, ravin de la Morges, etc.

Miocène moyen. III. Etage langhien (autrefois mayencien), faciès d'eau douce de l'helvétien ; Lausanne, Crissier, etc.

IV. Etage helvétien. Mollasse marine formant le sol du centre de la plaine suisse, descendant jusqu'au Mont sur Lausanne et Epalinges, mais n'atteignant pas le lac.

Miocène supérieur. V. Etage oeningien, dans le nord-est de la Suisse, n'est pas connu dans la contrée du Léman.

Ce sont les étages II et III, l'aquitanien et le langhien, qui sont seuls représentés sur les bords de notre lac. Le terrain aquitanien forme les murailles du Léman dans toute sa partie occidentale, depuis Clarens jusqu'à Genève sur la rive nord. Sur la rive sud, le premier lambeau miocène connu, aquitanien aussi, est dans le ravin du Foron, ruisseau qui se jette dans le lac au fond du golfe de Coudrée ; plus à l'est de ce point, les collines de Thonon, de la Drance, d'Evian sont tellement couvertes par le revêtement des terrains quaternaires que l'on n'y voit nulle part les couches anciennes, sauf en quelques gisements au fond du ravin de la Drance où l'on trouve le contact de l'alluvion ancienne avec le flysch, le lias et le trias. (1) La colline rocheuse des Allinges est, elle aussi, formée de flysch. Jusqu'à nouvel avis il est donc permis d'arrêter le terrain miocène sur la rive sud du Léman à l'extrémité occidentale du Grand-lac. Sa première apparition en descendant la vallée serait le côteau de Boisy et le plateau d'Excenevex, Yvoire, Nernier, Messery.

Notons cependant que les auteurs de la carte géologique suisse (feuille XVII) ont déterminé comme miocène et comme appartenant à la mollasse rouge de Vevey (IIe étage, aquitanien) la bande la plus rapprochée du lac du lambeau de terrain tertiaire qui s'étend du Bouveret à St-Gingolph ; le reste en serait du flysch. Les assises de grès du Bouveret plongeant au S.-E. par 30°-40° sont en stratification

(1) *E. Favre.* Arch. Genève LXI, 213, 1878.

inverse, le flysch étant superposé à la mollasse rouge. La voûte a donc été, ici comme ailleurs, fortement déjetée.

Les terrains aquitaniens, tous dépôts d'eau douce, présentent dans notre région les faciès suivants :

La mollasse rouge de Vevey et grès du Bouveret, mollasse, marnes et poudingues, fortement colorés en rouge par des sels de fer.

Les poudingues de Lavaux, nagelfluh, graviers agglomérés par un ciment compact, calcaire ; dépôt fluvio-lacustre.

La mollasse à lignites de la Paudèze.

Les mollasses, marnes, argiles et calcaire fétide alternant entr'eux en couches peu épaisses, forment le sol de toute la partie occidentale du bassin à partir de Lausanne. C'est un dépôt de région profonde d'un vaste lac.

En somme, sauf les parties que nous avons vues occupées par les terrains alpins (rive nord du Haut-lac jusqu'à Clarens, et toute la rive sud du Grand-lac) le bassin du Léman est creusé dans les assises du terrain aquitanien. C'est ce miocène inférieur qui forme la muraille nord du Grand-lac et toutes les murailles du Petit-lac.

Mais si, au lieu de nous en tenir au creux rempli par les eaux, nous considérons la vallée au fond de laquelle le Léman est situé, nous trouvons sur les talus de cette vallée, en un point circonscrit et peu étendu, apparaître un lambeau de miocène moyen. Les collines de Lausanne, le signal de Lausanne, la plaine du Loup, la côte de Cery, Crissier, plus bas l'éperon mollassique de Renens, tout cela est formé de langhien, mollasse d'eau douce correspondant aux assises les plus profondes de l'helvétien de Berne. M. E. Renevier le considère comme le faciès d'eau douce du terrain helvétien, probablement comme un dépôt d'embouchure de rivière dans la mer helvétienne. Quant à la mollasse marine du miocène moyen, helvétien proprement dit, elle s'avance au-dessus de ce lambeau de langhien et forme les plateaux de Cheseaux, du Mont, d'Epalinges, etc. Sans être positivement représentés dans les murailles du lac Léman, ces deux étages du miocène moyen sont donc apparents sur les talus de la vallée ; ils appartiennent au bassin du Léman, leurs eaux se déversent dans le lac, et nous devrons en tenir compte pour établir la date géologique du creusement du bassin.

Si nous suivons les deux rives du lac, nous pouvons reconnaître la nature des murailles géologiques comme constituée :

Rive nord : Sur la rive droite de la Tinière, une bande de lias ;

Entre l'hôtel Byron et Chillon, le jurassique inférieur ;

Le roc de Chillon, le lias ;

De Chillon à la Veraye, le rhétien et le trias ;

De la Veraye à Bon-Port, le lias ;

De Bon-Port à la baye de Montreux, le rhétien et le trias ;

De Montreux à Vernex, le néocomien ;

De Vernex à Clarens, le flysch ;

De Clarens à Genève, le miocène, aquitanien.

Rive sud : Du Bouveret à St-Gingolph, le grès du Bouveret, miocène, et le flysch ;

De St-Gingolph à Meillerie, (1) successivement le keuper, le rhétien, le sinémurien, le rhétien et le keuper, (2) soit un fond synclinal de roches secondaires ;

De Meillerie à Coudrée, nature inconnue, probablement secondaire et éocène sous le revêtement du quaternaire.

De Coudrée à Genève, mollasse aquitanienne.

En résumé, la nature géologique des murailles de la vallée du Léman varie d'une région à l'autre, et sous ce point de vue le lac peut se diviser en trois parties :

1° La partie orientale, au S.-E. du profil Clarens-St Gingolph, constitue une vallée transversale ou cluse, coupant perpendiculairement les replis des Préalpes formés de roches secondaires et éocènes. La plus grande partie de ce Haut-lac, autrefois occupée par le Léman, est aujourd'hui comblée et est remplie par la plaine du Rhône, de Massongex à Villeneuve-Bouveret.

(1) D'après *Alphonse Favre.* Rech. géol. II 76, sq.

(2) La superposition des terrains liasiques et triasiques est la suivante :

jurassique	
lias	toarcien liasien sinémurien hettangien rhétien (infra-lias)
trias	keuper muschelkalk grès bigarré

2° La partie moyenne, de Clarens au détroit de Promenthoux, représente presque tout le Grand-lac. Sa rive nord est formée de mollasse miocène. Sa rive sud est incontestablement liasique et jurassique jusqu'à la Tour-Ronde ; plus à l'ouest elle est revêtue par de puissants dépôts de terrains glaciaires et d'alluvions qui ne laissent voir qu'en quelques points des lambeaux de flysch éocène au fond du ravin de la Drance et sur la colline des Allinges ; il est probable que toute cette partie des murailles du lac est antérieure au miocène.

3° La partie occidentale, le Petit-lac, depuis le détroit de Promenthoux jusqu'à Genève, est creusée dans des bancs presque horizontaux de mollasse miocène, laquelle apparaît également sur les deux rives.

Quant au plafond du lac, il est recouvert par l'alluvion moderne, et nous ne connaissons pas directement la nature géologique de sa charpente profonde. Nous pouvons seulement la deviner. Nous admettrons que les mêmes terrains que nous voyons apparaître sur les talus émergés de la vallée se continuent dans les talus immergés et que les murailles du Haut-lac et de la rive méridionale du Grand-lac sont formées de roches secondaires ou éocènes, que celles de la rive nord du Grand-lac et celles du Petit-lac tout entier sont des roches aquitaniennes, miocène inférieur.

De ces faits nous pouvons tirer une première conclusion importante pour la théorie du lac : les actions, à démêler dans la suite, qui ont creusé le bassin du Léman sont postérieures à l'époque miocène moyenne. Les plus récentes des murailles du lac étant en terrain miocène inférieur, un lambeau de miocène moyen apparaissant à Lausanne dans les murailles émergées de la vallée, il est impossible que les actions de creusement se soient manifestées avant le dépôt de ces dernières couches et leur consolidation. Le lac n'existait pas encore, la vallée du Léman n'était pas même indiquée quand la mer helvétienne déposait les mollasses d'Epalinges et du Mont. Nous avons donc une date extrême parfaitement sûre. Le creusement du Léman est postérieur à l'époque miocène moyenne.

III. **Revêtements quaternaires.**

Sur les murailles rocheuses anciennes qui ont été creusées lors de la formation du bassin du Léman, nous trouvons une série de couches relativement modernes qui se sont déposées dans le lac depuis qu'il existe, ou sur ses bords, sur le plafond et sur les talus immergés et émergés de la vallée, depuis le creusement de celle-ci. Elles appartiennent toutes à l'ère quaternaire ou ère des terrains récents. Je les désigne dans l'histoire naturelle du lac sous le nom de *revêtements quaternaires.* Ce sont :

Les alluvions anciennes ;

Les terrains glaciaires ;

Les terrasses anciennes et modernes ;

Les alluvions modernes.

1° *Alluvions anciennes.*

Par dessus les terrains tertiaires miocènes, les premières couches de terrains quaternaires que nous connaissions dans la région du Léman sont une série d'assises stratifiées désignées par Necker sous le nom d'*alluvion ancienne.* Elles se divisent en deux étages : [1]

a Marnes à lignites (marne de fond de C. Vogt), l'étage inférieur. Marne d'un gris-bleu, quelquefois jaune, elle renferme de nombreux débris de végétaux à l'état de bois fossile ou de lignite, ainsi que des coquilles d'eau douce. Elle n'est connue que dans le canton de Genève, en aval du lac, à savoir au bois de la Bâtie, à Sous-Terre sur la rive droite du Rhône, à Cartigny sur sa rive gauche. Ces couches ne mesurent que 1 à 2^{m} d'épaisseur.

b Graviers, sables et conglomérats, couches puissantes de graviers roulés, souvent agglomérés, d'origine alpine, contenant le mélange de toutes les roches des Alpes ; la grosseur des graviers s'élève jusqu'à celle du poing ou de la tête. Ils sont arrondis, émoussés et marqués des coups qu'ils ont reçus en frappant les uns contre les autres dans les torrents qui les ont charriés. Exceptionnellement, A. Favre a trouvé

(1) *A. Favre.* Description géologique du canton de Genève I, 82. Genève 1880.

à Bonvard et à Mategnin (Genève) des cailloux striés, de provenance directement glaciaire. Cette alluvion ancienne graveleuse est représentée en trois points différents dans le bassin du Léman.

1° A l'extrémité occidentale de la vallée, où elle se rencontre très généralement depuis Hermance et Chambésy jusqu'au fort de l'Ecluse, sur les deux rives du Rhône. La localité la plus célèbre de cette alluvion ancienne, depuis les études de Necker, des Favre, etc., est le bois de la Bâtie, au sud du confluent de l'Arve avec le Rhône. M. E. Favre y a décrit en 1877 un lambeau de terrain glaciaire intercalé entre les couches de l'alluvion ancienne. (1) MM. Favre voient dans ce terrain des graviers déposés par les torrents, en avant du grand glacier du Rhône, dans la phase de crue ou en état stationnaire.

2° La colline de Bougy, au-dessus de Rolle, au nord-ouest de la partie occidentale du Grand-lac. Ce plateau, formé de couches puissantes de graviers, en assises stratifiées, plus ou moins cimentés, (2) reposant sur la mollasse, s'étend d'Aubonne à Begnins et s'élève à une altitude de 340m au-dessus du lac. L'épaisseur de l'alluvion ancienne, d'après Jaccard, n'est que de 25m environ. (3)

(1) *E. Favre.* Origine de l'alluvion ancienne. Arch. Genève LVIII, 18, 1877.

(2) Il s'est propagé au sujet de ces couches une singulière erreur, à laquelle il est temps de couper les ailes. R. Blanchet a publié dans le Bull. S. V. S. N. I. 258 sq. Lausanne 1844, un mémoire *sur la distribution du terrain erratique dans le bassin du Léman,* dans lequel il parle des cônes d'alluvion des torrents de l'époque glaciaire; il dit entr'autre: « En allant de Jongny à Châtel par la route neuve, on observe à gauche, en tournant le mont pour aller à la Combettaz, un de ces cônes parfaitement distincts; il a été formé pendant l'époque glaciaire par le petit ruisseau la Bergère. » Il s'agit évidemment d'une localité située sur la route de Vevey à Châtel St-Denis, un peu après Corsier et Jongny. Dans le tirage à part de ce mémoire, Blanchet a ajouté en note: « C'est dans cette localité que l'on trouve le poudingue poli et strié, comme si le glacier existait encore dans le voisinage. L'enlèvement du gravier pour l'empierrement de la route a mis à nu une des preuves les plus irrécusables du passage d'un glacier sur le Jorat. » Le poudingue en question est évidemment la nagelfluh mollassique, miocène de l'étage aquitanien, poudingue de La Vaux. — Par quel enchaînement d'idées, Alph. Favre, dans sa description géolog. du canton de Genève I, 91, a-t-il été amené à faire de ce poudingue un conglomérat de l'alluvion ancienne du signal de Bougy? M. Blanchet dit en parlant de l'alluvion ancienne de la Combettaz, près de Chastel, au N.-O. de Rolle, à 380m au-dessus du lac: « On trouve le poudingue poli et strié comme si le glacier existait encore dans le voisinage. » A. Favre en conclut que « par suite d'infiltrations calcaires, la solidité de ce conglomérat (d'alluvion ancienne) est devenue telle qu'il a pu prendre le poli glaciaire ». Il y a là confusion évidente de lieux, explicable peut-être par l'existence d'un village du Mont au pied du signal de Bougy, et d'une ferme de Châtel, entre Tartegnin et Essertines; mais il n'y a aucun

3° Les conglomérats de la Drance atteignent une épaisseur de 100m; ils reposent directement sur les roches anciennes, trias, lias et flysch. (1) Ils sont formés en majorité de cailloux de la vallée de la Drance, et non de matériaux provenant de la vallée du Rhône ; (2) c'est donc une alluvion de la Drance ou de ses glaciers. Morlot y a découvert en 1857 un lambeau glaciaire intercalé dans les conglomérats d'alluvion ancienne ; comme les conglomérats sont recouverts par des dépôts morainiques, il a tiré de ce fait une preuve en faveur de l'hypothèse de deux époques glaciaires séparées par un intervalle pendant lequel l'alluvion ancienne supérieure de la Drance aurait été formée. Rothpletz, (3) Brückner, (4) E. Favre, E. Renevier, moi-même, avons confirmé cette découverte de Morlot.

M. E. Brückner a constaté en 1886 que les conglomérats de la Drance, en assises horizontales dans les parties plus éloignées du lac, s'inclineraient, à partir du point marqué par le poteau kilométrique 5.2, en plongeant dans la direction du Léman sous un angle de 20° à 30° ; il en a conclu que ce sont des alluvions déposées dans un lac, un delta lacustre, une terrasse lacustre antéglaciaire ou interglaciaire. D'après cela, le lac Léman aurait eu pendant cette époque, avant la dernière période glaciaire, un niveau très élevé, à l'altitude du sommet de cette terrasse, 500 à 530m. Je n'ai pas su voir dans cette localité des faits aussi décisifs que ceux décrits par mon excellent collègue et ami de Berne ; j'ai reconnu à la place indiquée une inclinaison des couches d'alluvion ancienne ; mais elle m'a paru locale et je n'ai pas vu le développement étendu qu'exige l'hypothèse. Du reste, si le lac Léman

doute que l'observation de Blanchet a porté sur une localité des environs de Vevey, et que le poudingue dont il parle n'a rien à faire avec l'alluvion ancienne du signal de Bougy, mais est du poudingue de La Vaux. — Cette erreur de Favre a trompé MM. A. Rothpletz (das Diluvium um Paris, p. 88), A. Penck (Vergletscherung der deutschen Alpen, p. 276), Brückner (Vergletscherung des Salzachsgebietes, p. 164) et bien d'autres sans doute ; ce n'est donc pas inutile de la rectifier.

(3) *A. Jaccard.* Description géologique du Jura vaudois et neuchâtelois. Matériaux pour la carte géologique suisse. Livr. VI, p. 22. Berne 1869.

(1) *E. Favre.* Revue géologique suisse pour 1877. Arch. Genève LXI, 213, 1878.

(2) *A. Morlot.* Terrain quartaire du bassin du Léman. Bull. S. V. S. N. VI, 101, 1858.

(3) *A. Rothpletz.* Das Dilüvium um Paris. *in.* Mém. S. H. S. N. XXVIII, II, 86, 1881.

(4) *E. Brückner.* Die Vergletscherung des Salzach-gebietes, etc., 158. Wien 1866.

avait eu, pendant un temps assez prolongé pour justifier les énormes alluvions de la Drance, une altitude de 500m et plus, nous devrions retrouver les traces d'une terrasse analogue sur la majeure partie de ses anciens rivages. Or je ne vois guère à rapporter que les graviers décrits par Morlot autour de Cossonay, à une altitude un peu plus élevée, 585m, qui pourraient aussi avoir cette signification. Il semble plus probable que, soit les graviers de Cossonay, soit l'alluvion ancienne du signal de Bougy, soit les conglomérats de la Drance, étaient des dépôts d'affluents torrentiels latéraux qui, venant se butter contre le corps du grand glacier du Valais, y formaient des étangs locaux, à des altitudes diverses, sans relation les uns avec les autres, analogues à ceux que nous voyons sur le bord de tant de glaciers.

En résumé, il me paraît que cette alluvion ancienne n'est sûrement antéglaciaire que dans ses marnes à lignites du canton de Genève. Les conglomérats et sables de l'alluvion anciénne proprement dite sont ou interglaciaires, ou contemporains des glaciers voisins qui en apportaient les matériaux alpins des hautes vallées du Valais, du Chablais ou du Faucigny.

L'alluvion ancienne étant le terrain le plus ancien que nous connaissions dans notre pays au-dessus de la mollasse miocène, il est nécessaire d'en déterminer l'âge paléontologique, afin de juger si elle doit être attribuée aux époques miocène, pliocène ou quaternaire. F.-J. Pictet a décrit en 1845 les ossements recueillis dans les carrières de gravier de Mategnin (canton de Genève, entre Meyrin et Fernex); il y a constaté [1] la taupe, la marte, le putois, le chien, le rat, le campagnol, le cochon, le bœuf, le chamois, le mouton (ou chèvre), le crapaud, la grenouille, le lézard, etc. « Il est évident, » dit-il, « que les animaux « qui ont peuplé notre vallée à l'époque de ces graviers étaient iden- « tiques à ceux de l'époque actuelle. » A. Favre [2] a recueilli au bois de la Bâtie une défense d'éléphant qu'il attribue à l'*Elephas antiquus*, Falc. Les restes végétaux de l'alluvion ancienne du bassin du Léman n'ont pas encore été suffisamment étudiés. Nous n'avons à indiquer que quelques cônes de *Pinus abies* L, et une mousse, *Hypnum diluvii* Sch., trouvés par Morlot, soit dans les conglomérats de Thonon, soit

(1) *F.-J. Pictet.* Ossements trouvés dans les graviers stratifiés de Mategnin. Mém. soc. phys. XI, 85. Genève 1846.

(2) Description géol. du canton de Genève, loc. cit. I, p. 96.

dans les dépôts du signal de Bougy. [1] Mais les fossiles animaux suffisent pour affirmer que nous n'avons pas affaire à des terrains miocènes ou pliocènes, mais bien à des terrains quaternaires ; que la faune est celle de l'époque diluvienne. Les conclusions paléontologiques concordent donc avec celles de l'étude pétrographique pour relier les alluvions anciennes du Léman aux terrains glaciaires.

2° *Terrains glaciaires.*

Les matériaux déposés directement par le grand glacier diluvien du Rhône ont recouvert tout notre pays de terrains, souvent fort importants, qui ont donné aux plaines et collines subalpines des caractères tout particuliers : au point de vue pittoresque, il les a inégalisées et diversifiées par l'apparition locale des moraines et des blocs erratiques, tellement que Desor a pu leur appliquer l'appellation fort heureuse de *paysage morainique ;* au point de vue agricole, en fournissant des roches d'espèces les plus diverses, il en a fait un sol abondant en toutes espèces minérales, qui se prête aux cultures les plus riches et les plus variées. Le terrain glaciaire se présente sous des faciès très nombreux et différents, depuis les véritables moraines jusqu'aux graviers, aux sables, aux argiles compactes, etc. ; il est toujours remarquable par deux caractères distinctifs, à savoir :

a L'inégalité de grosseur des matériaux : au milieu du sable le plus homogène, de l'argile la mieux lavée (comme celle, par exemple, qui forme les magnifiques couches de la pointe d'Yvoire et de Nernier), on rencontre à chaque instant quelque caillou ou quelque bloc.

b La variété de nature des matériaux. Toutes les roches du Valais sont mélangées dans le terrain glaciaire ; l'on y voit, se touchant dans le contact le plus hétérogène, des granits; des protogines, des gneiss, des schistes, des calcaires, des grès de toutes les variétés provenant de toutes les grandes chaînes des Alpes valaisannes, vaudoises et savoyardes.

Ce revêtement glaciaire est très inégalement développé sur les bords du lac. Il est peu important là où la côte est abrupte, comme en certains points de La Vaux ou à Meillerie ; il est très considérable en d'autres points, tellement que la roche en place n'apparaît plus, par exemple, d'Evian à Thonon, de St-Prex à Bellevue, etc.

(1) *Heer*. Monde primitif, 657, Genève 1872.

Le terrain glaciaire se présente dans notre bassin sous plusieurs faciès, entr'autres :

La boue glaciaire ou argile glaciaire ; la masse fondamentale est une argile bleuâtre, contenant comme inclusion un nombre plus ou moins serré de graviers, cailloux et blocs. Ces pierres, bien protégées par la masse englobante, montrent pour la plupart la belle striation caractéristique. L'argile glaciaire est le dépôt principal de la moraine profonde.

Les sables, graviers et cailloutis, sont lavés, roulés, émoussés, ne présentant plus de striation ; ils sont en stratification mouvementée et représentent un dépôt torrentiel de la moraine profonde.

Les moraines, masses confuses de matériaux entassés, essentiellement de blocs, souvent énormes, déposés sur les bords latéraux et frontaux du glacier.

Quant aux moraines littorales de la côte du lac, elles sont, comme je l'ai dit, le résidu grossier de la boue glaciaire dont les masses argileuses ont été délavées par les vagues. Ce sont des dépôts remaniés par l'action du lac.

Le terrain glaciaire revêt les murailles du lac sur toute l'étendue de notre bassin, aussi bien dans les murailles émergées sur les flancs de la vallée, que sous le domaine des eaux. Dans cette dernière partie nous ne le constatons directement que dans la région littorale où nous le retrouvons partout représenté ; mais nous n'avons aucune hésitation à admettre qu'il se continue, sous l'alluvion moderne, sur les talus et le plafond du lac. Une preuve bien intéressante de la justesse de cette hypothèse a été donnée par notre découverte récente de la moraine sous-lacustre d'Yvoire. (1) Le terrain glaciaire recouvrant ainsi indistinctement les murailles du lac répond bien à ce que nous avons appelé un revêtement quaternaire, postérieur au creusement du bassin du Léman.

3° *Terrasses d'alluvion.*

Tout autour du lac on trouve sur la côte des dépôts sableux et graviéreux stratifiés, connus sous le nom d'alluvion des terrasses. Placés en général près de l'embouchure des cours d'eau, et à l'entrée des vallées, on les a signalés à Vevey, à Cully, à Lausanne, au Boiron, à

(1) Voyez p. 140.

St-Prex, à l'Aubonne, sur le plateau des Tranchées de Genève, à Thonon, etc. Ils ont été décrits d'abord par A. Morlot (1) et les géologues vaudois de son école, puis par M. B. Dausse, (2) par M. D. Colladon, (3) de Genève, puis enfin de la manière la plus complète par M. A. Favre. (4)

Ces dépôts consistent en sables et en graviers parfaitement lavés, sans traces d'argile ni de substance terreuse. Ils sont stratifiés en couches où les grains ont des grosseurs différentes. L'apparence extérieure de ces dépôts est caractéristique ; ils forment de véritables terrasses, quelquefois fort étendues, à surface supérieure presque horizontale, très égalisée, qui viennent s'appuyer contre le plan incliné de la terre ferme, et qui du côté du lac se terminent par un talus très abrupt de 30 à 35 degrés de pente. (5) Quant à la stratification de ces terrasses, elle est celle que nous avons décrite pour les cônes d'alluvion torrentielle dans le lac ; les couches profondes plongent du côté du lac suivant un angle de 30 à 35° (36° d'après Morlot) ; un plan horizontal coupe ces couches très inclinées et les sépare des couches supérieures également stratifiées, plongeant de même du côté du lac, mais extrêmement peu inclinées, presque horizontales.

Ainsi que l'a parfaitement reconnu Morlot, ces terrasses sont des cônes d'alluvion de rivières ou de torrents débouchant dans le lac, alors que la nappe d'eau était à peu près à la hauteur du plan d'intersection des couches presque horizontales et des couches très inclinées. Les matériaux amenés par le torrent et versés dans le lac y tombaient en s'éboulant sur le talus d'un mont qui s'avançait toujours plus avant dans les eaux ; à mesure que le mont se développait plus avant dans le lac, l'embouchure de l'affluent étant portée plus loin, la pente du torrent sur son delta diminuait, les matériaux n'étaient plus charriés jusqu'au lac, et de nouvelles couches déposées sur le delta ten-

(1) *A. v. Morlot.* Notes diverses sur les terrasses diluviennes du Léman. Bull. S. V. S. N. IV, 61, 92, V. 280, Lausanne 1853-57.

(2) *B. Dausse.* Actes de la S. H. S. N., 49e session. Genève 1865, p. 78. — Bull. soc. géol. de France, 2e sér. XXIII, 149, 1866, XXV, 752, 1868.

(3) *D. Colladon.* Description de la terrasse d'alluvion sur laquelle est bâtie la ville de Genève. Arch. de Genève, Sept. 1870. — Note sur les dépôts de la rivière d'Arve, ibid., oct. 1874. — Terrasses lacustres du Léman. Bull. S. V. S. N. XIV, 653.

(4) *A. Favre.* Recherches géologiques dans la Savoie. Paris 1867, I, 32. — Le canton de Genève, etc., I, 162.

(5) Soit une pente de 58 à 70 %.

daient à rétablir la pente normale du lit de la rivière. D'après cela, les couches horizontales doivent avoir leur maximum d'épaisseur au sommet du cône d'alluvion : elles sont nulles au bord extérieur du delta. On a ainsi, dans le plan de jonction des deux ordres de couches des terrasses d'alluvion, un excellent témoin des anciens niveaux du lac ; j'estime que ce plan devait correspondre à la surface de la grève inondée de l'ancien lac, et que la hauteur moyenne des eaux devait être de quelque un à deux mètres plus haut que cette ligne de jonction.

Les graviers et sables, dont sont constituées les couches des terrasses, sont des matériaux d'origine alpine ; c'est le mélange caractéristique des roches variées qu'a opéré le transport glaciaire. Donc les terrasses sont post-glaciaires ; c'est du terrain glaciaire remanié.

La belle disposition des couches de sable dans les terrasses et leur stratification régulière, la répétition des terrasses au même niveau, en diverses localités du pourtour du lac, montrent que ce n'est pas un dépôt torrentiel accidentel dans quelques étangs latéraux sur les flancs du grand glacier. Les terrasses sont un dépôt fluvio-lacustre. Tout dans leur ordonnance montre qu'elles ont été formées dans le lac Léman lui-même, après qu'il eut été débarrassé des glaces du grand glacier du Rhône ; mais, de plus, alors qu'il avait un niveau supérieur au niveau actuel. Ce niveau est indiqué par la cote d'altitude de ces terrasses, et l'on peut reconnaître des étages successifs dans la hauteur du lac.

A une première époque la nappe du lac était de 25 à 30^{m} plus élevée que le niveau actuel. Cet état a duré fort longtemps, car pendant ce temps se sont déposées les vastes et amples terrasses des Tranchées de Genève (altitude 403^{m}), de Nyon (alt. 404^{m}), de la Promenthouse, des Fontanettes, à gauche de l'Aubonne, la terrasse supérieure du Boiron, près Morges (alt. 400.1^{m}), etc. Cette terrasse est connue sous le nom de terrasse de trente mètres.

Après ce dépôt, est survenue une baisse rapide du niveau du lac, laquelle a été interrompue par un temps d'arrêt assez prolongé ; le lac s'est arrêté à un niveau de 10^{m} supérieur au niveau actuel, et cela pendant assez longtemps pour former au Boiron, près Morges, une terrasse de 100^{m} et plus de largeur.

Enfin, le lac s'est affaissé au niveau actuel.

Ces anciens niveaux du lac s'expliquent fort bien par l'existence d'un barrage au-dessous de Genève, formé par le plateau d'alluvion

ancienne de la Bâtie et d'Aïre, et par l'érosion progressive de ce barrage par le courant du Rhône. Le lac ne s'est en effet jamais étendu plus loin dans la direction du sud-ouest. A. Favre, qui a étudié cette question fort attentivement, déclare que l'on ne trouve nulle part au-dessous de Genève de terrasse lacustre à la cote 400-405^{m}, que les terrasses qui suivent les bords du Rhône, présentent la même pente que le Rhône actuel, et sont par conséquent des terrasses fluviales. L'ancien lac s'arrêtait au bois de la Bâtie. (1)

Ce qu'il est plus difficile de comprendre, ce sont les terrasses plus élevées que la terrasse de 30^{m}, entre autres les terrasses de Thonon. (2) La ville de Thonon est bâtie sur une terrasse à 60^{m} au-dessus du lac; au-dessus de la gare est une terrasse supérieure, de 75^{m} plus élevée que le niveau actuel du Léman; leur structure est identique à celle que nous venons de décrire pour les terrasses inférieures; elles semblent avoir une origine tout à fait semblable. Mais elles ne correspondent pas à des terrasses de même altitude sur l'autre rive; elles ne se rapportent à aucun barrage connu à la sortie du lac. J'avoue ne pas savoir en rendre compte, et je les recommande à l'étude de nos géologues.

Revenons à nos terrasses inférieures, à la terrasse de 30^{m}. Nous avons dit qu'elles sont formées de sables et graviers alpins, qu'elles sont par conséquent d'origine postérieure à l'époque glaciaire; j'aurais dû ajouter qu'on ne les voit jamais recouvertes par le terrain glaciaire proprement dit, par la boue glaciaire et les moraines, que par conséquent elles ne sont pas interglaciaires comme les alluvions anciennes. Mais ne pouvons-nous pas les localiser mieux dans ce long espace de l'histoire géologique de notre pays qui s'étend entre l'époque glaciaire et les jours actuels? A cette question, répond l'étude des faits paléontologiques. On a trouvé des ossements dans la terrasse de trente mètres, à savoir, à Cully (3) le renne, à Lutry et au Boiron de Morges (4) le mammouth, à St-Prex (5) le mammouth, le bœuf, le renne et le che-

(1) *A. Favre.* Canton de Genève. I, 168.

(2) De même aussi les terrasses de Vevey à 43^{m} et 56^{m} au-dessus du lac. *Favre.* Recherches. I, 42.

(3) Bull. S. V. S. N., VI, 460.

(4) *Ibid.* V. 308.

(5) Au musée géologique de Lausanne. C'est par erreur que dans le Bull. S. V. S. N. XII, 190, ces fossiles sont attribués à la ballastière du Boiron; ils proviennent, en réalité, de la gravière de St-Prex, près de la gare du chemin de fer.

val. Ces animaux appartenaient à la faune diluvienne et non à la faune moderne; ils étaient contemporains de la grande extension des glaciers. Leur présence dans ces graviers indique avec netteté que le dépôt de la terrasse de trente mètres a suivi de peu la retraite des glaciers ; qu'elle se rapporte à l'époque quaternaire et non à l'époque actuelle.

Donc, sitôt après la retraite du grand glacier du Rhône, le premier lac Léman était soutenu par un barrage à la hauteur du plateau de la Bâtie et Aïre au-dessous de Genève, et sa nappe était à un niveau relatif de 30^m plus élevé que le niveau actuel.

Quant à la terrasse moyenne, celle de 10^m, nous n'y connaissons pas de fossiles mammifères. La faune de mollusques que Morlot a recueillie au Boiron [1] consistant en *Limnaeus vulgaris* Pfr. *L. pereger.* Drap. *L. palustris* Müll. *L. minutus* Drap. *Paludina impura* Lam. *Valvata piscinalis* Nils. *Planorbis marginatus* Müll. *Cyclas*... n'est pas autrement caractéristique ; elle indique un dépôt lacustre d'époque récente ; elle est aussi riche que tout gisement moderne analogue ; elle prouve donc une population assez variée du lac, et doit par conséquent se rapporter à une époque déjà éloignée de la retraite des glaciers, moment où la faune lacustre a commencé à se reconstituer dans notre pays.

4° *Les alluvions modernes.*

Nous en avons déjà suffisamment traité dans une autre partie ; nous y renvoyons le lecteur, pages 112 et suivantes.

Ces quatre groupes de terrains que nous avons décrits dans le présent chapitre, appartiennent-ils bien au revêtement des murailles du lac, ainsi que je l'ai défini ? Il n'y a aucun doute que les alluvions modernes et les terrasses d'alluvion sont des dépôts récents formés dans le lac depuis l'établissement de celui-ci ; cela ne prête pas à discussion. A propos du terrain glaciaire, nous avons constaté son caractère de revêtement superficiel des murailles du lac au-dessus et au-dessous de la nappe des eaux.

Mais pour les alluvions anciennes, la question n'est pas aussi nette, et elle mérite d'être considérée attentivement. Nous venons, en effet,

(1) Bull. S. V. S. N. IV, 61, 1854.

de voir que les alluvions anciennes du bois de la Bâtie et d'Aïre avaient formé un barrage sur lequel le lac venait s'appuyer au début de son existence. N'est-ce pas là ce que nous appelons une muraille du lac? Quant aux vastes dépôts de Bougy et de la Drance, ils sont en dehors du domaine du lac, et leur continuation est interrompue au-dessous du lac. Mais pour le premier, celui de Bougy, il semble que la falaise qui regarde le lac est l'indice d'un éboulement de ses couches sur les parois de la vallée; il paraît être dans les mêmes conditions que les falaises de mollasse du langhien et de l'helvétien de Lausanne. Devons-nous placer le dépôt de ces alluvions avant, ou après le creusement de la vallée? Devons-nous leur attribuer la signification de murailles du lac ou de revêtement de ces murailles? La question est importante, car de la réponse dépendra l'époque à laquelle nous fixerons l'origine de la vallée du Léman. Je n'hésite pas à adopter la seconde solution. L'alluvion ancienne s'est déposée après le creusement de la vallée; c'est un revêtement superficiel des murailles du bassin. Je me fonde :

a Sur le grand espace de temps qui sépare l'époque miocène moyenne, le dernier des âges géologiques où nous ayons des murailles du lac indiscutables, de l'époque glaciaire où le bassin du lac était incontestablement formé. [1] Nous avons là place pour faire intervenir les actions puissantes qui ont modelé la surface de notre pays en creusant la grande vallée du Léman.

b Sur la contemporanéité probable d'une partie de ces alluvions anciennes avec l'époque glaciaire, laquelle est incontestablement postérieure au creusement de la vallée; sur la similitude entre les alluvions anciennes de la Drance, inférieures au lambeau glaciaire de Morlot, avec les alluvions supérieures à ce lambeau. Nous n'avons pas place dans le développement de ces alluvions pour y loger le phénomène, probablement de longue durée, du creusement de la vallée du Léman.

c Il n'y a pas connexion nécessaire entre les conglomérats de la Drance et les couches de Bougy; les premières sont formées d'alluvion savoyarde, les secondes d'alluvion valaisanne. Rien ne force à en faire une même assise se continuant à travers l'espace occupé par le lac, assise qui aurait été coupée par le creusement de la vallée.

[1] Pour les naturalistes qui attribuent le creusement du lac à l'action excavatrice des glaciers, je leur répondrai dans le chapitre suivant.

d L'explication que nous avons donnée de la formation de ces dépôts, dans des étangs latéraux du grand glacier du Rhône quand celui-ci occupait le milieu de la vallée, est parfaitement suffisante, et elle exclut l'interprétation de ces alluvions comme étant des murailles du bassin.

e La falaise que nous voyons découper les alluvions anciennes du signal de Bougy peut être un phénomène récent ; elle n'infirme en rien les conclusions ci-dessus.

Je ne vois aucune nécessité de placer le creusement du lac après le dépôt de l'alluvion ancienne, et je maintiens, jusqu'à preuve contraire, l'attribution que j'ai faite de ces couches au revêtement quaternaire des murailles du lac. Je me crois autorisé à conclure en me fondant sur la distinction que j'ai établie :

1° Les murailles du lac sont formées d'étages antérieurs au dépôt des couches du miocène moyen ; le creusement du bassin du Léman est postérieur à ces dépôts.

2° Les revêtements les plus antiques que nous connaissions sur les murailles du lac sont les alluvions anciennes du commencement de l'époque quaternaire ; le creusement du lac est antérieur à ces alluvions.

Utilisons maintenant les notions que l'étude de la carte hydrographique nous a fournies sur le dépôt des alluvions modernes, et celles que nous avons tirées de l'étude des alluvions anciennes et des dépôts glaciaires pour nous représenter le relief des murailles du lac et de sa vallée, pour nous figurer en imagination la carte géographique et hydrographique du Léman primitif, avant que son bassin ait été altéré par le dépôt des revêtements récents. Nous aurions à enlever les couches suivantes :

1° Les alluvions anciennes. Nous ne les connaissons pas dans le bassin immergé du lac, et nous n'avons pas de raison pour les y chercher ; dans la vallée émergée, nous supprimerions l'énorme colline du signal de Bougy, les immenses dépôts que traverse la Drance, sans parler des couches de cet étage qui, dans le canton de Genève, sont au-delà du domaine du lac.

2° Les terrains glaciaires ne doivent pas former des couches bien puissantes, si nous en jugeons par ce que nous pouvons constater sur la terre ferme de notre vallée ; les parties où nous devons leur attri-

buer la plus forte importance sont la grande moraine latérale de gauche de Meillerie à Thonon, le plateau bas d'Yvoire, la barre de Promenthoux. Partout ailleurs, les terrains de cet ordre ne doivent représenter des couches que de quelques mètres, disons de quelques dizaines de mètres d'épaisseur.

3° Les alluvions des terrasses post-glaciaires. Nous avons reconnu que la carte hydrographique du lac ne nous indique nulle part de terrasses immergées au-dessous de la nappe des eaux ; nous n'aurons donc pas à en chercher dans le domaine du lac. Sur les talus de la vallée, au contraire, les terrasses sont visibles tout autour du lac, mais leur importance est peu considérable ; les plus grandes sont celles de la Promenthouse, de la Drance et de l'Aubonne. Ces couches enlevées, les murailles de la vallée ne différeraient pas trop de ce que nous donne la carte géographique actuelle.

4° Les alluvions modernes du lac, à savoir :

a L'alluvion fluviatile grossière qui forme les deltas émergés ou immergés des affluents. Les deltas des affluents latéraux sont peu considérables : la Tinière, la Veraye, les bayes de Montreux et de Clarens, la Veveyse, la Venoge, l'Aubonne, la Promenthouse, etc., n'ont pas accumulé à leur embouchure des masses de graviers assez considérables pour que leur suppression modifie beaucoup la carte du lac. Le delta de la Drance est plus important, et, si l'on enlevait sa saillie, la figure du Léman en serait sensiblement altérée. Quant au delta du Rhône, il représente la plus grosse déformation que le lac ait subie dans la série des âges. La plaine du Rhône, de Villeneuve-le Bouveret à St-Maurice, pour ne pas remonter plus haut dans la vallée, a été comblée par les alluvions du fleuve alpin, et, pour nous figurer le Léman primitif, nous devons faire entrer sa vallée large et profonde, en continuation de celle du lac, bien avant dans la cluse du Valais. Supprimez la partie immergée et émergée de ce cône d'alluvion, la nappe du lac se continue au moins jusqu'à St-Maurice, et la plaine centrale amène ses eaux profondes entre les Alpes vaudoises et les Préalpes bas-valaisannes.

b. L'alluvion fluviatile impalpable a rempli le plafond du lac, aussi bien dans la plaine centrale du Grand-lac que dans les fosses du Petit-lac. Quelle est l'épaisseur de ses couches ? Je la suppose peu importante au fond des cuvettes de la partie occidentale du lac. Mais dans la plaine centrale du Grand-lac je présume, au contraire, qu'il y a un

revêtement puissant d'alluvion fluviatile impalpable ; les murailles du lac doivent continuer leur pente avec les mêmes allures que nous leur voyons sur les talus jusqu'à ce qu'elles se rencontrent dans une rigole médiane continuant la rampe ascendante du plafond du Grand-lac.

c L'alluvion lacustre grossière. Les terrasses immergées de la beine sont un accident intéressant de la structure du lac, mais, au point de vue qui nous occupe, leur volume est presque nul ; si nous les supposions enlevées, le relief du sol ne serait que fort peu modifié.

d L'alluvion lacustre impalpable. Cette couche uniforme, répandue sur toute la surface du bassin, doit être d'épaisseur à peu près égale partout, mais de très peu d'importance, car les accidents du relief primitif restent encore apparents, malgré le manteau de cette alluvion. Pour arriver aux murailles du lac nous devons la supprimer.

Supposons tous ces revêtements quaternaires et modernes enlevés, il nous restera les murailles du lac ; nous aurons le relief du Léman primitif. Ce sera une belle vallée partant de la cluse de St-Maurice avec des parois fort inclinées à gauche et à droite se réunissant dans un plafond dont la situation nous est absolument inconnue. Cette vallée descendra vers le lac actuel, creusée d'abord dans les terrains secondaires et éocènes jusqu'à Clarens et la Tour-Ronde, puis dans les terrains miocènes. Dans les roches relativement plus anciennes du Haut-lac, les talus de la vallée sont fort inclinés ; la même pente continue sur les flancs miocènes de La Vaux où les mollasses rouges et poudingues sont de consistance fort tenace. Notons encore un fait, car il aura une grande importance pour la théorie du lac : au point de contact entre les terrains alpins et les terrains de plaine, ni la carte hydrographique actuelle, ni la carte hydrographique historique que nous construisons mentalement en supposant les murailles du lac à nu, ne montrent de changement d'allures, de ressaut, d'accidents. Les murailles du lac se continuent directement en passant d'un terrain à l'autre, d'une formation à l'autre. Le changement d'allures, au contraire, se constate, mais cependant encore avec des transitions ménagées, quand nous arrivons dans la partie occidentale du Grand-lac, où les terrains aquitaniens, beaucoup plus diversifiés, consistant en couches alternantes de mollasses, de marnes, d'argiles, de calcaires, se sont éboulés et effondrés beaucoup plus facilement : la pente du talus des murailles du lac y est plus douce. Ce même fait

s'observe sur le talus savoyard comme sur le talus vaudois. C'est à l'entrée du Petit-lac que notre carte hydrographique des murailles du lac différerait le plus de la carte actuelle. La pointe de Promenthoux est formée par des terrasses d'alluvion et par le delta de la Promenthouse, la barre de Promenthoux par le cône immergé de la Promenthouse et par la moraine sous-lacustre d'Yvoire ; le plateau d'Yvoire, Excenevex, Nernier est formé de terrains glaciaires d'épaisseur inconnue. A quelle profondeur sont les murailles du lac ? Comment les figurer. Je présume que, si nous les avions à découvert, l'étranglement du lac moderne en ce point disparaîtrait presque entièrement, que la séparation en Grand et Petit-lac s'effacerait et que la vallée du Petit-lac continuerait presque sans secousses ou transitions celle du Grand-lac. Quant aux barres transversales du Petit-lac qui séparent ce bassin en une série de cuvettes, je suppose que ce sont des moraines frontales enfouies sous l'alluvion lacustre ; les revêtements du lac enlevés, le Petit-lac nous représenterait une vallée régulière, à plafond ascendant s'élevant lentement du côté de Genève.

Tout cela n'est qu'hypothèses ; mais je les crois légitimes et admissibles.

III. Théorie du Léman.

Quelle est l'origine du lac ? Quelle force l'a creusé ? Quand a-t-il été formé ?

A cette question, la réponse est singulièrement malaisée. Tandis que nombre de lacs ont une nature parfaitement simple et évidente à la première étude, le Léman, comme du reste la plupart des lacs subalpins, est difficile à expliquer ; sa théorie est encore obscure et en grande partie hypothétique. La géologie moderne est arrivée à établir quelques faits positifs dans son histoire ; d'autres restent encore à l'état de pure hypothèse. Nous aurons à débrouiller les dates et faits admis et admissibles, en gardant une réserve prudente sur les points qui sont douteux ou seulement probables. Sur cette base, hélas ! trop incertaine, nous aurons le choix, ce qui est le plus difficile, entre différentes explications théoriques d'ordres fort divers ; nous devrons chercher quelles sont les plus plausibles et, si cela est possible, nous

décider entre elles. La tâche est compliquée et ardue ; elle nécessitera de longs développements.

Un lac est un réservoir dans lequel s'accumulent les eaux d'écoulement superficiel et de drainage du pays. Qui dit réservoir dit dépression du sol, bassin creusé dans les couches de la terre ou soutenu par un barrage. L'étude des faits géologiques et géographiques nous apprend que l'établissement ou le creusement d'un tel bassin ne peut provenir que d'un nombre restreint de causes. Un lac peut être dû :

A des faits de plissement des couches terrestres ;

Au creusement par action mécanique des couches non disloquées ;

A l'établissement d'une digue formant barrage autour d'une cuvette.

Il y a bien peu de lacs qui soient dus à une de ces causes agissant seule : le plus souvent leur origine est compliquée. C'est ainsi qu'un plissement des couches, une rupture des couches ou l'érosion de l'eau peuvent établir une vallée, une dépression en forme de rigole allongée constituant les parois latérales d'une cuvette ; mais pour que celle-ci devienne un bassin dans lequel les eaux s'accumulent, il faut qu'un barrage, provenant d'une cause souvent très différente, élève la paroi aval du creux et empêche les eaux de s'écouler. Dans ce cas l'existence du lac est due aussi bien au barrage, ou encore plus au barrage, qu'aux phénomènes de plissement des couches ou d'érosion qui avaient creusé la vallée. La plupart des lacs sont, par leur origine, des lacs mixtes.

La plus grande diversité d'origine se rencontre dans l'histoire du développement des lacs ; dans chaque cas spécial, pour chaque lac, il y a lieu de rechercher les actions qui ont amené la formation de la cuvette et la stagnation de l'eau dans cette cuvette. Avant de faire cette recherche pour le Léman, nous devons donc établir, après tant d'autres, la classification systématique des lacs sur la base de leur origine.

1° *Lacs orographiques.*

On dit qu'un lac est de nature orographique [1] quand il est dû à des

[1] Nous aurions dû, peut-être, employer de préférence l'expression moderne *tectonique*, qui est plus précise.

plissements, à des soulèvements ou à des effondrements des couches de la terre. Il y a lieu de distinguer :

a L'établissement d'une cuvette dans le pli concave de couches formant vallée synclinale. C'est ce que Desor, [1] dans sa classification des lacs basée sur la terminologie géologique du Jura, appelait un lac de vallon.

b L'établissement d'une cuvette dans une rupture longitudinale, une fente déterminée par un excès de plissement sur le sommet ou les flancs d'une voûte. Les lèvres de la fente s'écartent par le fait du soulèvement du noyau intérieur de la voûte ; l'érosion d'une partie des couches supérieures peut intervenir pour élargir le bassin du lac. Suivant la direction de plongement des couches, la vallée ainsi produite est :

Ou bien anticlinale, les couches plongeant de chaque côté dans une direction opposée. Ce cas ne se produit que sur la ligne de faîte d'une voûte non déjetée.

Ou bien isoclinale, les couches plongeant des deux côtés de la vallée dans la même direction. Cette disposition des couches peut se présenter ou bien sur les flancs d'une voûte, ou bien au sommet d'une voûte fortement déjetée.

Ces trois types sont réunis par Desor sous le nom de lacs de combe. Je préfère les appeler lacs de vallée anticlinale et lacs de vallée isoclinale.

Desor établissait un type de lacs orographiques qu'il appelait lacs de cluse, leur bassin étant creusé dans une vallée transversale (*Durchbruchthal*, cluse). La géologie actuelle n'admet plus que ces vallées transversales soient dues uniquement à des ruptures, à des fissures des couches, à des faits orographiques ; elle n'y voit plus, comme action dominante, que des phénomènes d'érosion. C'est donc à un autre groupe que doit rentrer ce type de lac, qui est du reste parfaitement caractérisé.

c L'établissement d'une cuvette peut être dû à un effondrement du sol causé par l'éboulement des voûtes d'une caverne souterraine. Un tel lac, que nous appellerons lac d'effondrement, ne saurait avoir, si nous ne nous trompons, ni une grande étendue, ni une grande profondeur. En effet, des cavernes un peu considérables ne peuvent

(1) *E. Desor*. De la physionomie des lacs suisses ; Neuchâtel 1860.

exister que dans les couches supérieures de la terre. Les grands espaces vides que l'on admettait autrefois entre le noyau liquide et l'écorce solide du globe ne sauraient exister si les idées modernes sur la viscosité des matériaux solides sous l'effet de la compression sont exactes. Or, dans les strates superficielles de la croûte terrestre, de vastes cavités, de kilomètres de largeur, sont inadmissibles ; les lacs d'effondrement seront donc nécessairement de dimensions restreintes.

d L'établissement d'un bassin peut être dû à un affaissement local sur le cours d'une vallée ou à un affaissement général de l'ensemble du pays. Les eaux, qui auparavant s'écoulaient librement vers la mer, ne trouvant plus la pente nécessaire, s'accumulent en nappe dans la cuvette ainsi formée.

e Enfin un soulèvement local peut faire barrage sur le cours d'un fleuve, et retenir les eaux qui s'étendront en lac derrière la digue.

L'école de Lyell a peut-être abusé de ces accidents locaux pour expliquer facilement tout ce qui ne trouvait pas immédiatement sa solution d'une autre manière ; la géologie actuelle a peut-être trop la tendance d'oublier ces phénomènes dont l'action est cependant parfois incontestable.

Les cuvettes formées par ces divers faits orographiques peuvent être perfectionnées ou complétées par des barrages accidentels, comme nous allons le voir bientôt.

2° *Lacs d'érosion.*

En second lieu, les lacs peuvent être formés par des actions mécaniques de creusement, par l'érosion. A ce point de vue on peut penser à trois actions différentes : à l'eau courante, aux glaciers, aux vents.

a Erosion par l'eau courante. L'eau est le grand agent d'érosion ; c'est à elle que sont dues la plus grande partie des vallées ; c'est elle qui creuse, qui sculpte les continents. Mais l'eau courante ne saurait à elle seule former un lac ; l'érosion qu'elle produit ne peut creuser qu'un plan incliné, à profil longitudinal plus ou moins régulièrement ou irrégulièrement en pente jusqu'à la mer ; elle ne saurait excaver un bassin. Ce n'est qu'au pied d'une cascade que l'on voit l'eau former des creux et encore ceux-ci sont-ils si petits et si peu profonds qu'ils ne méritent pas le nom de lacs.

Une vallée creusée par érosion de l'eau peut cependant être fermée par un barrage et constituer ainsi la cuvette d'un lac. C'est même une des causes les plus fréquentes de la formation des lacs, ainsi que nous le verrons à propos des lacs mixtes.

b Erosion par le vent. Le vent enlève le sable desséché d'une steppe et le transporte sur les bords du désert. Il est possible, il est probable que quelques-uns des chotts et sebkas du Sahara ont été creusés par une telle action. Mais elle ne saurait entrer en compte pour la production des lacs des Alpes.

c Erosion par les glaciers. Ramsay, Tyndall, G. de Mortillet, Gastaldi et plus récemment les Geikie, Penck et son école ont attribué aux glaciers le creusement des lacs subalpins. (1) Ils se sont fondés essentiellement sur un argument géographique, à savoir l'abondance des lacs dans le domaine des anciens glaciers et leur absence presque complète dans toute autre région. Je ne veux pas reprendre ici tous les arguments géologiques et glaciologiques qui ont cherché à réfuter cette théorie. Je renvoie en particulier aux excellentes dissertations de Studer, (2) de A. Favre, (3) de A. Heim (4) et de Pfaff. (5) Pour mon compte, en me basant sur ce que je connais de l'action des glaciers actuels sur le sol de leur vallée, je ne puis aucunement accepter l'idée de l'excavation du bassin des lacs par les glaciers.

Si je précise le sens des mots dans cette question, si j'appelle érosion le creusement d'une vallée en pente continue, et excavation le creusement d'une cuvette, avec contrepente depuis le point de profondeur maximale jusqu'à la sortie de l'émissaire, je dirai que l'effet d'érosion des glaciers peut être fort, mais leur puissance d'excavation est nulle. Ils glissent sur le sol de la moraine profonde, en le bousculant un peu par places, mais sans y creuser une cuvette. Partout où j'ai pénétré sous le glacier — et j'ai assez souvent pratiqué cet exercice pour citer ici mon expérience personnelle, — j'ai toujours vu le sol incliné dans le sens de la vallée ; je ne l'ai jamais vu excavé sous

(1) Un excellent exposé historique des théories excavationnistes des glaciers se trouve dans le chapitre XVI du livre de *A. Penck :* Die Vergletscherung der deutschen Alpen, p. 368 sq. Leipzig 1882.

(2) *B. Studer.* De l'origine des lacs suisses. Archives de Genève, XIX, 89. 1864.

(3) *A. Favre.* Recherches géol., loc. cit. I, 186.

(4) *A. Heim.* Die Gletscherkunde, p. 371 sq. Stuttgart 1885.

(5) *F. Pfaff.* Die Gletscher der Alpen. Heidelberg 1886.

forme d'un bassin où les eaux pourraient devenir stagnantes. Nulle part dans les grands espaces de terrain mis à nus par la phase de décrue des glaciers — et de 1850 à 1880 ou 1890, la grande période de retraite des glaciers nous en a montré de beaux exemples, — je n'ai vu trace d'un bassin, d'un étang creusé par l'érosion glaciaire. (1) Pas même au pied des parois verticales de rochers où les glaciers se précipitent en cascades, et où l'eau courante aurait excavé des creux profonds, on ne trouve des bassins dus à l'érosion glaciaire. (2) L'érosion glaciaire tend à égaliser les parties saillantes ; elle attaque les digues et barrages et tend à les supprimer : le transport de la boue glaciaire dans la moraine profonde tend à combler les creux et à remplir les bassins préexistants ; le glacier ne creuse pas de lacs ; il supprimerait plutôt ceux qui existeraient sur son cours. C'est du moins ce que nous apprend l'étude des glaciers actuels dans les Alpes.

Cette question est assez importante, la théorie de l'excavation des lacs par les glaciers est soutenue avec assez d'ardeur et d'éclat par une école puissante de très savants géologues, elle se lie trop intimement à notre étude pour que je ne croie pas devoir la traiter avec attention.

Le glacier est un agent puissant d'érosion. Il est probable que l'eau sous forme solide, quand elle s'écoule dans la marche majestueuse du glacier, agit plus sur le transport des matériaux détritiques que lorsqu'elle est sous la forme liquide. Sans parler des matériaux de moraines superficielles qui sont charriés au bas de la vallée plus loin qu'ils ne le seraient, sans l'intervention de la masse glacée qui les porte, par la seule action de la pesanteur, il semble évident qu'un torrent gla-

(1) Le seul cas que je connaisse d'une dépression constatée pendant la récente période de décrue des glaciers est celui d'un petit lac de 145 ares de superficie au-devant du glacier d'Obersulzbach, dans le massif des Tauern occidentaux. M. Ed. Richter, qui l'a décrit, n'a pas eu de peine à montrer combien peu cet étang peut être invoqué comme un argument en faveur de l'excavation des lacs par creusement glaciaire. Zeitschr. des deutschen und œsterr. Alpen Vereines XIX, 37, München 1888.

(2) Je citerai comme preuve fort démonstrative le cas du glacier du Rhône, qui de 1856 à 1890 a laissé à nu, dans sa décrue continue, un cône aplati de moraine profonde de plus d'un kilomètre de longueur. C'est au pied de l'une des plus puissantes cascades de glaces connues ; c'est, semble-t-il, dans les conditions les meilleures pour produire une excavation, si celle-ci était possible. Il n'y en a pas trace. Le lit du glacier remonte en pente douce jusqu'au front actuel du glacier, et il est évident que cette pente se continue sans contre-pente jusqu'au pied de la paroi de rochers sur laquelle le glacier cascade.

ciaire transporte, année moyenne, plus d'alluvion vers la plaine qu'un torrent de même volume, ou drainant un territoire équivalent en surface qui ne serait pas occupé par un glacier. Pendant tout l'été le torrent glaciaire a son eau troublée par une alluvion impalpable, tandis que le torrent non glaciaire ne se salit que dans ses crues d'orage. Je ne puis appuyer cette affirmation sur des chiffres, (1) mais elle me semble d'évidence probable. (2)

Cette masse énorme d'alluvion que charrie un torrent glaciaire vient en majeure partie de la trituration de la moraine profonde, en partie aussi de l'usure des murailles de la vallée. Disons d'abord quelques mots de la première de ces deux actions.

Lorsque l'on étudie l'eau d'un torrent glaciaire, on la voit changer de teinte d'un jour à l'autre : en hiver elle est parfaitement limpide, en été elle est trouble ; dans cette dernière saison, elle est d'autant plus sale, plus chargée d'alluvion, que le torrent est plus fort et que son débit d'eau est plus puissant ; il suffit de quelques jours de pluie ou de grandes chaleurs pour l'amener à son maximum d'opacité ; il suffit de quelques journées de gelée qui arrête la liquéfaction du glacier pour rendre l'eau presque transparente.

J'ai souvent entendu attribuer le trouble des eaux glaciaires au mouvement même des glaciers. Il y a eu un temps où l'on supposait que les glaciers sont stationnaires en hiver, et ne cheminent plus ; l'on se fondait sur la limpidité des torrents glaciaires dans cette saison. C'est là une interprétation parfaitement erronée du phénomène ; le trouble des torrents glaciaires n'est dû qu'indirectement au mouvement des glaciers. Voici en quelques mots la vraie explication des faits. Le mouvement d'écoulement du glacier fait rouler les uns sur les autres les cailloux de la moraine profonde ; il les fait polir et rayer les roches en place ; par ces frottements il y a production d'une poussière minérale qui se loge entre les interstices des pierres. Cette trituration a lieu toute l'année, hiver comme été, car le glacier chemine en

(1) Il serait bien utile qu'un naturaliste, à portée de deux torrents de même importance, l'un en territoire glaciaire, l'autre en terrains libres de glaces, pût comparer la valeur du transport des deux cours d'eau pendant une année entière pour le moins. Les résultats qu'il obtiendrait seraient du plus haut intérêt.

(2) A. Heim, dans sa *Gletscherkunde*, p. 364, arrive cependant à une conviction opposée ; il estime que le transport en alluvion grossière et impalpable des torrents glaciaires est moindre, infiniment moindre que celui des ruisseaux et torrents ordinaires.

toute saison ; mais en hiver, en l'absence d'un parcours suffisant de l'eau sous le glacier, ces poussières restent en place et ne sont point entraînées. Avec les chaleurs estivales, au contraire, le glacier commence à se liquéfier ; les eaux de fusion tombent sur le lit du glacier et y constituent le torrent glaciaire ; ces eaux lavent la moraine profonde et enlèvent les poussières accumulées pendant la saison morte; à mesure que la production d'eau augmente, l'eau atteint des parties jusque-là épargnées ; à mesure que le débit du torrent s'accroît, il attaque et érode davantage les falaises de son lit sous-glaciaire. Les matériaux de trituration, qui s'étaient emmagasinés dans la moraine profonde pendant toute l'année, sont pris par le cours de l'eau et d'autant plus entraînés que le débit du ruisseau est plus puissant.

Les variations journalières et saisonnières du trouble des torrents glaciaires indiquent donc simplement des variations dans le débit du torrent et non des variations dans l'activité du glacier. Ce n'est pas à dire qu'il ne puisse pas y avoir, dans la puissance de transport du torrent glaciaire, un ordre supérieur de variation dûe aux modifications d'activité du glacier, liée aux grandes phases de crue et de décrue du glacier, transport plus puissant pendant la crue, transport plus faible pendant la décrue, variation de périodicité beaucoup plus prolongée, périodicité semi-séculaire. (1) Ces variations mériteraient d'être étudiées ; mais elles ne pourraient l'être que par des observations à très longue échéance, qui n'ont pas encore été abordées.

A côté de la trituration des blocs de la moraine profonde rouiés les uns sur les autres par la poussée du glacier ; il y a encore l'usure des murailles de la vallée, l'abrasion de la roche en place. Il y a, en effet, dans le mécanisme du glacier, tout ce qu'il faut pour produire une telle érosion : il y a mise en mouvement des pierres de la moraine profonde qui sont entraînées par la progression lente mais irrésistible du corps du glacier, et frottées sur les parties saillantes des roches formant les murailles immobiles du vallon ; il y a pression énorme des masses de glace superposées ; il y a enfin, et c'est là une condition essentielle, enlèvement des produits de trituration des sables et poussières par les torrents sous-glaciaires, qui empêchent l'appareil de s'encrasser.

(1) *F.-A. Forel.* Variations périodiques des glaciers des Alpes, X^e rapport. Jahrbuch des schw. Alpen Clubs, Berne 1890.

C'est dans ce dernier détail que je trouve l'argument le plus puissant contre la théorie de l'excavation des lacs par les glaciers. Le glacier érode les roches sous-jacentes tant qu'il est dans une vallée en pente, tant que la moraine profonde est lavée par l'eau courante des nombreux ruisselets qui vont se réunir dans le torrent glaciaire, tant que les parties meubles, formées par l'usure des cailloux de la moraine glaciaire et de la roche en place, sont enlevées par les crues estivales du torrent gonflé par la liquéfaction de la glace. Mais sitôt que ce débarras des sables et poussières serait interrompu, dès que la moraine profonde viendrait à s'encrasser par l'argile, produit ultime de la trituration des matériaux pierreux, le glacier glisserait sur cette masse onctueuse, et n'attaquerait plus la roche sous-jacente.

De même que, dans notre machinerie moderne, pour faire utilement fonctionner une scie, une lime ou une meule, nous sommes obligés de nous débarrasser, par un courant d'air, ou un courant d'eau, ou par des mouvements alternatifs de l'instrument, des poussières ou sciures qui, sans cet artifice, ne tarderaient pas à s'accumuler et à protéger la surface à attaquer ; de même le glacier ne peut scier, ou limer, ou user le sol rocheux de la vallée que si les poussières et sables de trituration sont enlevés au fur et à mesure par le courant des eaux sous-glaciaires.

Autre comparaison, plus adéquate, et par conséquent meilleure. De même, quand nous voulons polir une table, la poudre d'émeri, que nous promenons en la pressant avec le brunissoir, doit n'avoir qu'une épaisseur modérée. Sitôt qu'elle est en trop grande épaisseur, le frottement du corps mobile met bien en mouvement les couches supérieures de la poussière, mais les grains roulent les uns sur les autres sans entamer les couches inférieures ; la plaque qu'on voudrait polir serait entièrement protégée contre l'action du corps mobile qui s'agite, inutile, à quelque distance au-dessus d'elle. De même au fond d'une cuvette où les eaux sous-glaciaires deviendraient stagnantes, la moraine profonde augmenterait assez d'épaisseur pour supprimer toute action d'érosion sur les roches sous-jacentes ; de plus, les poussières de trituration n'étant pas délavées par l'eau courante, ne tarderaient pas à former des terres glaises, des argiles qui protègeraient encore mieux le sol contre les frottements du glacier.

A cela les partisans de l'excavation des lacs par érosion glaciaire répondent : la moraine profonde fait corps avec le glacier ; elle forme

une masse congelée, adhérente avec lui ; elle chemine, elle se transporte avec lui, par conséquent elle peut éroder. Je ne puis admettre cette riposte. En effet, l'observation des faits actuels nous montre, chaque fois que nous pénétrons sous un glacier, que la masse de glace est parfaitement distincte et séparée de la moraine profonde : la première repose sur la seconde, elle la presse, elle la déforme par place, elle la bouleverse dans ses déplacements, mais elle ne la pénètre pas ; la limite entre la glace, parfois assez sale, souvent remplie de débris de la moraine interne, et la masse caillouteuse et sableuse de la moraine profonde est parfaitement tranchée ; l'une est de la glace contenant quelques pierres enchassées dans sa masse, l'autre est du sable ou du cailloutis imbibés d'eau. La glace glisse sur le sable et ne fait qu'en bousculer la couche superficielle.

Mais, dira-t-on, il en est ainsi dans la région inférieure du glacier, et pendant la saison chaude où se font les excursions d'été. Il n'en est plus de même dans les régions élevées du glacier, où le sol n'est jamais dégelé ; il n'en est plus de même en hiver quand tout est gelé sous le glacier. La moraine profonde doit dans ces cas être une masse congelée ; pourquoi ne pas admettre qu'elle se soude avec le glacier et fait corps avec lui ? — Je ne me rends pas à ces objections.

Et d'abord à la première. La moraine profonde des régions élevées du névé et du glacier supérieur, là où le sol est constamment au-dessous de zéro, peut-elle être soudée au glacier ? Je l'ignore ; je ne me rappelle pas l'avoir jamais vue par moi-même, et je ne me rends pas bien compte de son état. Je la crois peu abondante et peu épaisse, car dans ces hautes régions, l'apport des matériaux qui la nourrissent, soit des moraines superficielles, soit des moraines latérales, doit être très faible ou nul ; il n'y a point de torrents affluents qui y amènent des galets. Je me représente la glace presque pure en contact avec la roche encaissante, l'usant très peu et très mal ; car la glace à elle seule n'a pas de pouvoir d'érosion ; il y manque la poudre dure qui transformerait la glace en une lime.

Du reste, pour la question qui doit nous occuper, l'excavation des lacs du pied des Alpes, il est évident que cette objection n'a que faire. La position du Léman, même au moment où le glacier du Rhône débordait par les passes du Jura jusque dans les plaines de France, était dans la région inférieure du glacier ; les névés ne s'étendaient pas jusqu'à la plaine suisse ; la moraine profonde, dans la cluse de St-Maurice,

dans la plaine du bas Rhône, dans le bassin du Léman, ne formait pas une masse constamment congelée.

A la seconde objection qui se rapporte à la congélation hivernale de la moraine profonde dans les régions terminales du glacier, voici ce que je répondrai : en hiver, la moraine profonde ne peut former une masse compacte de glace qui se souderait au glacier ; en effet, l'eau qui l'imbibe en été, l'eau intersticielle, la nappe d'eau souterraine, le *Grundwasser*, disparaît, s'écoule, s'abaisse à mesure que la fusion se ralentit. En été, par un jour de grande chaleur, la moraine profonde est pénétrée d'eau ; l'eau suinte de toutes parts, déborde sur tout et partout ; mais après quelques journées de froid, la liquéfaction s'arrêtant, l'eau s'écoule, et la moraine profonde s'assèche. Je ne prétends pas qu'elle ne reste pas humide — il n'y a pas d'évaporation dans ces cavernes sous-glaciaires — mais la nappe souterraine s'abaisse ; l'eau d'imbibition s'est écoulée. En hiver, quand la gelée pénètre sous le glacier, la moraine profonde est presque sèche ; les grains du gravier, du sable humide, se collent bien les uns aux autres par des ponts minuscules de glace entre les parties contiguës. Mais cela ne forme pas une masse homogène, compacte de glace, et la première poussée du glacier réduira en poussière cette masse sans ténacité ; elle est incapable de résister à la pression, d'entraîner avec le glacier les couches sous-jacentes. La prise en masse de la moraine profonde et son union en un bloc de glace faisant corps avec le glacier ne seraient possibles que si l'eau y était stagnante, s'il y avait formation d'une cuvette, d'un bassin, sous le glacier. Mais celle-ci n'aurait pu se former que si l'érosion avait été puissante et souveraine, comme le veulent les excavationnistes, que si la moraine profonde, entraînée dans toute son épaisseur, avait excavé la roche en place. Il y a là cercle vicieux : D'une part, le glacier ne creusera pas de cuvette tant que la moraine profonde ne sera pas entraînée par le glacier ; d'une autre part, le glacier n'entraînerait la moraine profonde que si la cuvette avait été excavée. Il m'est impossible de voir là les conditions indispensables pour l'excavation des grands bassins de nos lacs subalpins ; je ne puis comprendre par de tels procédés le creusement du bassin du Léman.

Les excavationnistes répondent à cette objection : « le glacier refoule les matériaux triturés et les fait remonter par dessus la barre du bas-

sin qu'il a creusé; la moraine profonde accumulée dans la cuvette est évacuée par deux procédés :

a A l'état d'alluvion impalpable tenue en suspension dans l'eau qui forme le lac sous le glacier; ce lac est constitué par de l'eau trouble; l'alluvion fine reste en suspension dans l'eau qui surmonte la barre, et l'émissaire l'emporte par dessus celle-ci.

b A l'état de masse plastique. Un corps lourd pressant sur la couche plastique sur laquelle il repose — un boulet de canon posé sur l'argile imbibée qui remplit une cuvette — chasse de tous côtés cette couche molle, et la fait sortir par dessus les bords. »

A ces deux hypothèses, je réponds :

A la première : Si sous le glacier il existait des cuvettes remplies d'eau trouble, celle-ci déposerait de l'alluvion dans les crevasses baignées par ce lac sous-glaciaire et, au front du glacier, là où le fond des crevasses vient à nu par la fusion destructive de la glace, nous trouverions des couches stratifiées, reconnaissables dans ces cavités. Je ne connais rien qui se rapporte à cela.

A cette première hypothèse je ferai une autre objection. Admettons ce lac sous-glaciaire rempli d'une eau trouble qui s'écoulerait par dessus la digue de soutien. Nous devons nous demander d'où proviendrait l'alluvion suspendue dans cette eau : elle viendrait certainement du torrent glaciaire qui, suivant le thalweg supérieur, se jetterait dans le lac sous le glacier; elle ne viendrait pas, ou ne viendrait que pour une portion minime seulement, de la moraine profonde de la cuvette du lac sous-glaciaire. En effet, pour que l'eau se charge d'alluvion, il faut qu'elle soit courante; il faut qu'elle érode des masses meubles, préalablement déposées, il faut qu'elle les dissocie pour les prendre en suspension. Or, l'eau dans un lac sous-glaciaire est relativement stagnante ; elle ne doit pas s'y charger d'alluvion; elle doit, au contraire, en déposer. Quant aux mouvements du glacier qui, bousculant la moraine profonde, pourraient jusqu'à un certain point amener un délayage de ses couches argileuses, ils sont si lents, quelques décimètres par jour, que cette action doit être très faible. Quand aux courants qui, je le reconnais, doivent exister dans la masse stagnante du lac sous-glaciaire pour faire passer l'eau d'une crevasse à l'autre, ils doivent circuler essentiellement entre des murailles de glace et par conséquent très peu attaquer le sol.

Je puis invoquer, en faveur de ces notions, le seul cas à moi connu où il semble qu'il y ait un lac sous-glaciaire dans les Alpes; c'est celui du glacier de Puntaiglas qui descend des Piz Urlaun et Frisal pour s'écouler dans le Rhin antérieur à Trons. Voici ce qu'en dit Heim : [1] « Le torrent du glacier de Puntaiglas, la Ferrera, présente certaines « particularités très curieuses et encore non expliquées. Il est formé ordi-« nairement d'une eau beaucoup plus claire que celle des autres torrents « glaciaires; son eau n'est jamais laiteuse *(Gletschermilch)*. En second « lieu, son régime est beaucoup plus régulier que celui des autres « torrents; il croît très peu en temps de pluie, tandis que les crues de « son voisin le Zinzerabach, causent souvent des ravages terribles. « Mais, par contre, la Ferrera présente chaque année une crue extraor-« dinaire, au milieu de la saison chaude, en général dans la deuxième « moitié de juillet... Cette crue est subite, et dure vingt-quatre heures, « au plus deux jours. Dans les douze premières heures, l'eau croît « progressivement, et entraîne avec elle des galets et des blocs de « plus en plus gros; puis elle décroît aussi régulièrement qu'elle avait « crû. L'eau reste trouble encore plusieurs jours après que le torrent « est revenu à son régime normal.... On peut se demander si le gla-« cier, dont la surface est très plate, ne passerait pas sur le bassin « d'un lac ; ses eaux s'y clarifieraient tandis que le lac, comme d'au-« tres lacs glaciaires visibles sur le flanc du glacier, s'évacuerait pério-« diquement. » Quand le lac sous-glaciaire de Puntaiglas a son écoulement régulier par dessus sa digue de rochers et de glaces, l'eau est claire et ne charrie pas d'alluvion; quand l'eau se trouble, c'est que la rupture de la digue ayant eu lieu, une grande masse torrentueuse lave le lit inférieur du glacier. Mais alors l'alluvion qui salit cette eau ne vient pas de la moraine profonde du lac sous le glacier. C'est ainsi que l'alluvion qui blanchit la Massa lors des écoulements périodiques du lac Merjelen, sous le glacier d'Aletsch, n'est pas la vase déposée depuis la précédente crue au fond du lac glaciaire; quand celui-ci s'écoule, son eau n'est pas troublée dans le lac lui-même; elle ne se charge d'alluvion qu'en délavant le glacier et le lit de celui-ci.

Ce procédé d'évacuation de la moraine profonde par l'alluvion impalpable dans un bassin lacustre sous-glaciaire, doit être extrêmement peu actif; il me paraît qu'il n'y a pas lieu d'en tenir compte, si l'on

[1] *A. Heim* Mechanismus der Gebirgsbildung, I. 267.

songe qu'il devrait expliquer le creusement de bassins d'une centaine de kilomètres cubes comme le lac Léman, dans un temps qui n'est pas infiniment grand.

A la deuxième hypothèse, la masse plastique de la moraine profonde est refoulée sur les bords, je réponds : je ne connais rien qui puisse faire penser à cela dans les glaciers actuels. Quant aux glaciers quaternaires qui auraient, par ce procédé, excavé la cuvette de nos lacs, ils auraient dû, si je ne me trompe, déposer dans les moraines latérales ce matériel ainsi refoulé, car c'est dans la direction des profils transverses d'un glacier que les résistances à une telle évacuation auraient été à leur minimum. Les moraines latérales sont encore en place, du moins il en reste assez de témoins pour que nous puissions juger de leurs dimensions originales. Or, je le demande, qui voudrait trouver dans ces moraines de l'ancien glacier du Rhône le cube nécessaire pour remplir le bassin du Léman ?

Encore un point : les adeptes de l'excavation glaciaire des lacs attribuent au glacier un pouvoir d'érosion qui paraît inadmissible. Ils estiment que les galets et cailloux de la moraine profonde proviennent en notable partie du sous-sol. Que le glacier use et polisse la roche en place en glissant sur elle, et surtout en frottant sur elle les sables et cailloux d'une moraine profonde pas trop épaisse, qu'il y ait participation ainsi de la roche sous-jacente à la formation de la poussière impalpable qui salit l'eau du torrent glaciaire ou qui constitue la masse argileuse de la boue glaciaire, c'est parfaitement acceptable. On peut même aller plus loin et accorder qu'accidentellement il y ait quelques fragments d'une roche très fissurée et très friable, ou découpée en porte-à-faux, qui soient brisés par le poids du glacier et englobés dans la moraine profonde. (1) Mais, que ce dernier cas soit fréquent, que l'on puisse attribuer à ce contingent une partie notable des blocs et cailloux ou galets de la moraine profonde, c'est certainement aller trop loin ; fait exceptionnel, oui, mais fait ordinaire, ou constant, non. Qu'il me soit permis d'invoquer ici mon expérience de tailleur de pierres. Pour étudier les procédés antiques de fabrication des outils de pierre de nos ancêtres préhistoriques, nous avons, mon père et moi, taillé et

(1) J'en ai vu un exemple, en 1890, sous le glacier du Rhône, dans la grotte où se précipite le torrent du Gratschluchtgletscher. C'était un point où la pente du lit était fort inclinée, et où les parties saillantes des roches proéminaient en porte-à-faux.

poli bien des haches, [1] et je me rends assez bien compte de l'action du frottage d'une pierre sur la meule dormante. Or, si je consulte mes souvenirs, je retrouve quelquefois le détachement d'une esquille, la rupture d'un fragment d'une pierre trop fissurée, soumise ainsi à l'usure du frottement ; mais c'est si rare que je ne puis y voir que des accidents insignifiants et qui méritent à peine d'être notés.

En résumé, j'attribue à la glace un puissant pouvoir d'érosion des flancs et du fond de la vallée, dans laquelle s'écoule le glacier. C'est le mouvement du glacier qui triture les cailloux de la moraine profonde (cailloux qui proviennent des moraines latérales et des moraines superficielles) ; c'est le mouvement du glacier qui use et polit la roche en place en faisant frotter sur elle les graviers et cailloux de la moraine profonde. Mais cette dernière action n'opère que lorsque la couche de moraine profonde n'est pas trop épaisse ; il faut que l'entraînement de la face inférieure du glacier puisse se communiquer de couche en couche, dans la profondeur de ces gravois, jusqu'à la plus inférieure, à la couche qui est en contact avec la roche, pour que cette dernière soit usée ; il faut aussi que la moraine profonde ne soit pas constituée par une argile trop tenace, sur laquelle le gravier glisserait trop facilement. Pour cela il faut nécessairement que le fond de la vallée glaciaire soit parcouru par un torrent d'eau et par ses nombreux affluents qui enlèvent les parties trop fines, trop poussiéreuses, qui feraient mastic ou ciment ; il faut que ce torrent s'écoule et ne soit pas stagnant. Dès l'instant où il n'y aurait plus d'eau courante, dès l'instant où il y aurait diminution de la pente, et, à plus forte raison, contrepente et formation d'un étang ou d'un lac, le procès d'érosion cesserait absolument.

Donc l'action glaciaire, qui peut creuser ou élargir une vallée inclinée, ne saurait creuser une cuvette ; elle peut éroder une vallée, elle ne peut excaver le bassin d'un lac.

Si nous résumons ce paragraphe sur les lacs dits d'érosion, nous constaterons que l'érosion aérienne, celle du vent à elle seule est capable de creuser une cuvette, tandis que l'érosion de l'eau et celle du glacier ne peuvent que creuser des vallées ; elles ne suffisent pas à elles seules pour établir le bassin où se logerait un lac.

[1] *F.-A. Forel.* Sur la taille des haches de pierre. Matériaux pour l'hist. de l'homme, VI, 521. Toulouse 1875.

3° *Lacs de barrage.*

Un lac peut être formé par un barrage constituant digue et soutenant les eaux. Ce barrage peut être :

a La circonvallation plus ou moins circulaire du cratère d'un volcan éteint.

b Une coulée de lave barrant une vallée.

c Un éboulement de montagne.

d Le corps d'un glacier (lac de Merjelen au glacier d'Aletsch, lac du Gurgl dans l'Oetzthal, lacs temporaires de Bagne, etc.).

e La moraine latérale supérieure d'un glacier barrant une vallée (lac de Mattmarck, vallée de Saas).

f Je ne connais pas d'exemple où la moraine frontale aurait à elle seule formé le barrage d'un lac. La moraine frontale d'un glacier est coupée par le torrent glaciaire, et jamais je n'ai vu un lac s'accumuler derrière elle. Il n'est cependant pas impossible d'imaginer l'occlusion accidentelle du canal torrentiel par quelques blocs tombés de la moraine ou du glacier, et l'établissement par ce mécanisme du barrage complet d'un lac. J'inscris donc ici ce type de lac, tout en déclarant que je n'en ai pas d'exemple à citer dans les glaciers actuels. Quant aux exemples tirés des moraines des glaciers anciens, il me paraît qu'il y a presque toujours des actions complexes.

Il y a cependant certaines mares, dans le fouillis des moraines frontales des glaciers, qui peuvent être rangées dans ce groupe. Lorsque dans deux crues successives les moraines frontales forment des digues se coupant à angle aigu, l'eau peut s'accumuler dans les cavités ainsi formées et constituer de petits lacs morainiques. Ce ne sont le plus souvent, vu leur très petite taille, que des étangs de peu d'étendue et de peu de profondeur.

g Le cône d'alluvion d'un affluent torrentiel qui vient se jeter à angle droit dans une vallée principale. Je reviendrai plus loin sur ce cas spécial qui me semble présenter un grand intérêt pour la théorie du Léman.

4° *Lacs mixtes.*

Sauf le cas des cratères d'un volcan, tous les barrages que je viens d'énumérer forment une digue droite ou peu incurvée. Ils ne peuvent donc à eux seuls représenter les murailles du bassin d'un lac. Il faut, pour que les eaux s'y accumulent, qu'elles soient contenues par les parois d'une dépression préexistante qui complètent le barrage sur les autres côtés. Cette dépression est en général une vallée, soit vallée orographique, soit vallée d'érosion. Il en résulte que les lacs de barrage sont le plus souvent des lacs mixtes, dont l'origine est due à l'existence primordiale d'une vallée et à l'intervention secondaire d'un barrage.

D'une autre part, nous avons vu que jamais les vallées d'érosion ne peuvent à elles seules former le bassin d'un lac ; il faut, pour que l'eau puisse s'y amasser, que la vallée soit fermée par un barrage accidentel ou par un soulèvement local. Nous pourrions montrer qu'il est de même bien rare que les vallées orographiques puissent constituer un bassin fermé, sans l'intervention d'une digue.

Il en résulte qu'il est très peu fréquent que la nature d'un lac soit simple; il en résulte que la plupart des lacs sont d'origine mixte. Nous avons donc une quatrième classe de lacs, les lacs mixtes qui combinent dans leur origine l'action de deux facteurs.

Nous n'essaierons pas de décomposer cette classe en types distincts. Toutes les combinaisons possibles peuvent être imaginées entre les diverses actions qui établissent la vallée ou la dépression du sol, et celles qui établissent le barrage. Chacune de ces combinaisons formerait un type spécial de lac mixte ; leur énumération serait oiseuse

En résumé, nous aurons les classes et types des lacs :

PREMIÈRE DIVISION, LACS SIMPLES

Première classe. Lacs orographiques.

1° Lacs de vallée synclinale.
2° — anticlinale.
3° — isoclinale.
4° Lacs d'effondrement.

5° Lacs de soulèvement local.

6° Lacs d'affaissement local.

Deuxième classe. Lacs d'érosion.

7° Lacs d'érosion par l'eau (représentés seulement dans les lacs mixtes).

8° Lacs d'érosion par les glaciers (de même, seulement dans les lacs mixtes).

9° Lacs d'érosion par les vents.

Troisième classe. Lacs de barrages.

10° Lacs de cratère volcanique.

11° Barrage par une coulée de lave.

12° Barrage par l'éboulement d'une montagne.

13° Barrage par le corps d'un glacier.

14° Barrage par la moraine latérale supérieure d'un glacier.

15° Barrage par la moraine frontale d'un glacier.

16° Barrage par l'alluvion d'un torrent affluent d'une vallée principale.

Les nos 11, 12, 13, 14 et 16 ne sont représentés que dans des lacs mixtes.

DEUXIÈME DIVISION. LACS MIXTES

Quatrième classe. Dépressions orographiques barrées.

Cinquième classe. Vallées d'érosion barrées.

Je n'énumère pas tous les types possibles de ces deux dernières classes.

Sur la base de cette classification, à quel type appartient le lac Léman ? Telle est la question qui se pose à nous. La réponse n'est pas d'évidence immédiate, à en juger par la divergence entre les auteurs qui se sont appliqués à la donner. Il me paraît que nous pouvons grouper les opinions énoncées à ce sujet en les attribuant à trois écoles principales :

L'école orographique. Les lacs subalpins en général, le lac Léman en particulier, ont leur bassin établi par les plissements ou ruptures des couches du sol. Pour Alphonse Favre (1) le Léman est d'origine purement orographique : sa partie supérieure, le Haut-lac, est une

(1) Recherches géologiques, loc. cit. I, 186, sq.

cluse traversant les Alpes antérieures, le Petit-lac est un vallon, soit vallée synclinale, de la mollasse. La courbure générale du lac a été déterminée par la forme semi-circulaire des montagnes de la Savoie, dont les chaînes sont évidemment parallèles à l'axe incurvé du lac : Dent d'Oche, monts d'Armonnaz, monts de Thonon, Voirons, pour ne citer que la chaîne qui borde le Léman.

Pour E. Desor ([1]) le Léman est un lac composé ; je ne dis pas un lac mixte dans le sens que j'ai défini plus haut, vallée d'origine quelconque transformée en bassin par un barrage d'origine quelconque aussi, mais je dis un lac composé par la juxtaposition de deux parties d'origines différentes. Sa partie supérieure, le Haut-lac, a tous les caractères d'un lac de cluse (lac orographique pour Desor), tandis qu'à partir de Vevey, et surtout de Lausanne, l'aspect des rives change, et le lac présente les indices d'un lac d'érosion. Le géologue neuchâtelois n'a du reste pas indiqué les conditions dans lesquelles aurait pu se faire une telle complication.

Bernard Studer peut aussi, me paraît-il, être rangé dans cette école. Dans son étude sur l'origine des lacs suisses, ([2]) après avoir réfuté les théories des excavationnistes glaciaires, il établit que les grandes vallées des Alpes ont été formées par des crevasses résultant des soulèvements, dislocations et torsions que le pays a éprouvés, spécialement à l'époque miocène ; il admet que ces crevasses ont dû être comblées une première fois, ce qui a permis le passage, sur leur dépression, de l'alluvion ancienne du cours inférieur des vallées ; enfin que des affaissements ultérieurs ont eu lieu sur la ligne des crevasses : « De grands vides dans le fond des fractures ont pu rester non remplis, des étranglements de la roche ou la grosseur des premiers blocs engouffrés ont pu arrêter le remplissage de la vallée ; plus tard le poids de ce toit temporaire ayant augmenté, ou peut-être la pesanteur des glaciers diluviens s'y ajoutant, l'obstacle a pu céder et le sol qu'il soutenait s'écrouler. »

L'école excavationniste glaciaire attribue le creusement du bassin à l'action des glaciers, les uns admettant que c'est le glacier qui a érodé les couches rocheuses et excavé le bassin lui-même, les autres que les glaciers ont simplement enlevé l'alluvion qui avait rempli une dépres-

([1]) *E. Desor.* De la physionomie des lacs suisses, Revue suisse, Neuchâtel 1860.
([2]) Arch. Genève, XIX, 89, 1864.

sion autrefois établie par d'autres agents. Sans nommer ici tous les naturalistes qui se rattachent à cette école, et qui directement ou indirectement se sont occupés du lac Léman, je ne citerai que le plus récent d'entr'eux, le Dr Ed. Brückner, professeur à Berne, qui nous donne la note la plus moderne de l'école de naturalistes dont nous avons à parler. Penck et ses collaborateurs ont, en effet, ajouté aux arguments généraux des excavationnistes glaciaires, un argument d'observation géologique fort intéressant. Ils ont constaté que la moraine profonde des glaciers diluviens, et l'alluvion torrentielle déposée au devant du glacier (alluvion glaciaire, *Glacial-Schotter*), représentent dans les Alpes orientales des couches plus ou moins stratifiées, dont les plus anciennes ont été ultérieurement creusées par érosion, et sont restées des deux côtés des vallées sous la forme de terrasses. Ils admettent que cette érosion est due à l'action des glaciers, dans une seconde époque ou période glaciaire; quand ils reconnaissent ces terrasses d'alluvion glaciaire ancienne des deux côtés d'un lac, ils attribuent le creusement du bassin lacustre à l'excavation glaciaire. M. Brückner, après avoir étudié attentivement les terrains glaciaires des Alpes allemandes et autrichiennes, est venu rechercher ces faits dans notre vallée, et il estime les avoir reconnus et démontrés.

Il (1) voit dans la discordance, constatée en plusieurs points des environs de Genève, entre l'alluvion ancienne et la moraine glaciaire sus-jacente, la preuve que l'alluvion ancienne a été érodée par le glacier. Comme il retrouve l'alluvion ancienne à la fois sur les deux rives du Petit-lac, à Hermance, la Belotte, Cologny, sur la rive sud, à Chambésy et Mategnin, sur la rive nord, il en conclut que cette partie du lac a été creusée par érosion glaciaire dans un lit d'alluvion ancienne. Le Petit-lac serait donc dû à l'érosion glaciaire. La même conclusion serait, d'après Brückner, probable pour la partie moyenne du lac Léman, car l'on trouve de même sur les deux rives de l'alluvion ancienne (conglomérats de la Dranse et du signal de Bougy). Du reste ce géologue, l'un des plus ardents défenseurs de l'érosion glaciaire, admet dans ses dernières conclusions un âge très ancien du bassin du Léman, et il concède que la seconde époque glaciaire n'est pas l'auteur de l'excavation originelle du lac, mais de sa réexcavation et de son approfondissement.

(1) Die Vergletscherung des Salzachsgebietes, nebst Beobachtungen über die Eiszeit in der Schweiz, p. 168. Wien 1886.

Une dernière *école*, enfin, celle des *érosionnistes*, attribue l'origine des lacs subalpins à deux actions successives : la première, creusement d'une vallée par érosion de l'eau courante ; la seconde, mise en stagnation de l'eau dans cette vallée par un mouvement de bascule de la région, ou bien par le soulèvement du cours inférieur, ou bien par l'affaissement du cours supérieur. Si le lac Léman a une telle genèse, il appartient à notre classe des lacs mixtes. J'ai à citer trois auteurs qui ont énoncé ces idées.

Avant tous, le maître de la géologie moderne, Charles Lyell, a émis en quelques lignes une théorie des lacs subalpins en général ; je reproduis *in extenso* ce paragraphe remarquable, qui a trop souvent été oublié dans les discussions modernes, par moi-même le tout premier. Après avoir critiqué et réfuté brièvement les théories des excavationnistes glaciaires, sir Charles continue ainsi : [1]

« De quelle manière se sont créés les bassins des grands lacs, si ce n'est pas la glace qui les a creusés? Ma réponse est qu'ils doivent tous leur origine à des mouvements de soulèvement et d'affaissement inégaux... Pendant la durée incalculable des âges post-miocènes qui précédèrent l'époque glaciaire, les principaux bassins hydrographiques des Alpes eurent amplement le temps de subir l'érosion lente des eaux, et les emplacements de tous les grands lacs coïncident, suivant la remarque très juste de Ramsay, avec les grandes lignes d'écoulement des eaux. Les cavités qui contiennent les lacs ne sont pas orientées suivant les dépressions synclinales, suivant les affleurements et les plis des couches, mais, comme le remarque le même géologue, les coupent souvent à angle droit ; elles ne sont pas non plus la conséquence de fentes et de fissures béantes, quoique ces accidents, ainsi que d'autres qui se rattachent au mouvement de dislocation des Alpes, aient pu quelquefois déterminer la direction primitive des vallées... Supposons, avec Charpentier, que les Alpes se soient élevées de mille mètres et plus à l'époque où le froid intense de l'époque glaciaire se faisait sentir ; ce soulèvement graduel aura été une ère d'érosion aqueuse, qui aura creusé, élargi et prolongé les vallées. Il est fort peu probable que l'élévation du sol ait dû partout être d'amplitude identique ; mais si elle n'eût jamais été plus forte sur les bords de la chaîne que dans les régions centrales, elle n'aurait pas donné nais-

(1) Ancienneté de l'homme, trad. M. Chaper, p. 332, Paris 1864.

sance à des lacs. Cependant, si la période de soulèvement a été suivie par une autre d'affaissement graduel, le mouvement n'étant pas partout uniforme, il se sera formé des bassins des lacs partout où la vitesse de dénivellation de la région la plus élevée l'aura emporté. »

Lyell se perd ensuite dans une intervention des glaciers qu'il juge nécessaire pour empêcher les lacs d'être comblés pendant leur approfondissement par les alluvions torrentielles. Sauf cette dernière partie que je juge parfaitement inutile, je n'hésite pas à souscrire entièrement à la théorie du grand géologue anglais.

Rütimeyer, (1) dans son étude magistrale, si riche en faits et si suggestive sur l'origine des vallées et des lacs, est le grand promoteur en Suisse de l'idée de l'érosion aqueuse. C'est à cet agent qu'il attribue le creusement de toutes les vallées des Alpes, et il considère les lacs actuels *(Randseen)* comme les restes à peu près intacts de la vallée, autrefois approfondie jusqu'au plafond de ces bassins. La partie supérieure aurait été comblée par les alluvions torrentielles ; la partie inférieure aurait été barrée par un soulèvement local qui aurait déterminé la position de l'origine de l'émissaire. Pour ce qui regarde plus spécialement le Léman, sa partie orientale, d'après Rütimeyer, le Haut-lac se continuait autrefois par la vallée de la Venoge et le canal d'Entreroches, au travers du Mortmont, dans la plaine de l'Orbe et le lac de Neuchâtel. Ce bassin faisait ainsi une vallée d'écoulement, ou un seul lac, analogue aux autres lacs du pied des Alpes, qui traversent la région mollassique ; comme ces autres lacs, il suivait la ligne de plus grande pente pour arriver à la grande gouttière collectrice du pied du Jura, qui emmenait dans l'Aar et vers le nord-est les eaux de tout le versant septentrional des Alpes suisses. Quant à la partie occidentale du Léman qui se dirige du côté de Genève, elle aurait, suivant Rütimeyer, une origine secondaire, et se serait creusée lorsque la cluse du Vuache aurait été coupée à travers le Jura. Quant au rétrécissement du lac au détroit d'Yvoire, il est précisément sur la ligne de dislocation qui part des Voirons, passe par les coteaux de Boisy et de Bougy, le cirque de Vaulion, le lac de Joux et Pontarlier.

A. Heim, dans sa grande monographie du groupe du Tödi, (2) n'a pas eu à s'occuper spécialement du lac Léman ; mais les pages qu'il con-

(1) Thal und Seebildung, p. 74.

(2) Mechanismus der Gebirgsbildung, I, 316, Basel 1878.

sacre à l'origine du lac des Quatre-Cantons sont assez générales pour que nous puissions l'invoquer dans cette citation des auteurs qui ont traité de la genèse des lacs subalpins. C'est à l'érosion de la vallée par l'eau courante qu'il attribue le creusement du lac d'Uri. Il se base sur divers arguments excellents en général, mais son argument principal est loin d'être démonstratif à mes yeux. C'est à l'horizontalité parfaite du plafond du lac, dans le bras qui s'étend de Fluelen à Brunnen, qu'il s'attache surtout, et cette horizontalité étonnante, il déclare qu'elle ne peut être due qu'à la nature primitive du fond d'une vallée érodée par l'eau courante (son deuxième stade de la formation d'une vallée, celui dans lequel le ravin s'élargit en un plafond à section transversale plane, par le fait des divagations serpentines du cours du fleuve). Nous verrons ailleurs que cette parfaite horizontalité du plafond du lac a de tout autres causes, et est due au dépôt de l'alluvion fluviatile impalpable amenée dans les grands fonds par la plus grande densité de l'eau des affluents glaciaires. Quoi qu'il en soit de ce point de détail, l'étude remarquable que fait Heim à ce sujet le place au premier rang parmi les partisans de l'érosion comme agent dominant dans le creusement des vallées et des lacs. Quant à la tranformation de la vallée d'érosion en cuvette, Heim en trouve la cause dans diverses actions locales : « Tantôt c'est un éboulement de montagne, tantôt un cône d'alluvion torrentielle, tantôt le soulèvement des chaînes extérieures, tantôt l'enfoncement des chaînes intérieures, tantôt enfin c'est plusieurs de ces causes réunies qui ont rendu stagnante l'eau qui coulait autrefois sur le plafond de la vallée. »

Heim résume son opinion sur la genèse et l'extinction des lacs dans la phrase suivante qui exprime aussi parfaitement les idées de Rütimeyer : « Les lacs sont une phase transitoire, passagère, dans l'histoire d'une vallée. Ils sont formés par arrêt de l'eau, barrée par une digue ; ils ne tardent pas à être comblés par l'alluvion. Aussitôt que le lac est rempli, l'émissaire est tranformé en un cours d'eau chargé d'alluvion ; si la digue est constituée par de la roche en place, elle est attaquée par l'érosion ; l'alluvion qui remplissait le lac est emportée en laissant des terrasses comme témoins de sa hauteur primitive. Stagnation, comblement et creusement ultérieur, sont les phases, toutes transitoires, du développement et de l'extinction des lacs. » Le lecteur verra que pour mon compte je suis tout disposé à souscrire à ces idées.

Heim enfin, tout récemment, dans son histoire du lac de Zurich, (¹) s'est prononcé très fermement dans un sens presque identique à celui que nous défendons. Le lac de Zurich est une vallée d'érosion, transformée en bassin par des soulèvements postérieurs.

C'est sous la bannière des érosionnistes que je suis amené à me ranger. Pendant longtemps, satisfait des notions de l'école orographique, j'avais accepté les vues d'Alphonse Favre et je cherchais, dans des faits de rupture et de plissement des couches, l'origine de la cuvette du lac Léman. Mais des objections très sérieuses m'ont détourné de ces idées et, après avoir admis les généralisations de Rütimeyer, j'arrivais de plus en plus à la théorie du Léman basée sur la notion d'un lac mixte, vallée primitive creusée par l'érosion aqueuse, puis transformée en bassin par le soulèvement de la partie inférieure de son cours. Enfin, je me suis séparé de mon maître et ami de Bâle, en cherchant le mouvement principal de bascule qui a rendu les eaux stagnantes dans l'affaissement de la partie alpine de la vallée, et j'ai formulé, (²) dans l'hiver 1889-90, la théorie que je défends actuellement. Amené à ces notions par l'étude des faits locaux et spéciaux au Léman, j'avais cru faire œuvre originale. Ce n'est que plus tard, en reprenant la littérature du sujet, que j'ai trouvé l'exposé des vues de Lyell, qui avait énoncé bien avant moi la même théorie générale, et je me suis empressé alors de rendre hommage aux droits antérieurs du grand géologue anglais. (³) Je cesse donc de réclamer tout titre à la priorité de cette théorie qui avait été parfaitement établie avant moi. Mais je me crois cependant autorisé à donner le résumé que j'en avais rédigé avant d'avoir pris connaissance des idées de Lyell ; le lecteur y trouvera peut-être certaines présomptions en faveur d'une théorie à laquelle plusieurs auteurs sont arrivés d'une manière indépendante.

Avant d'en venir à l'exposé de mes vues personnelles sur la question de l'origine du Léman, je me permettrai quelques réflexions sur les conditions générales d'un tel problème.

Tout d'abord, je constate la très grande difficulté de la question qui

(¹) Neujahrsblatt der Zürcher Naturf. Gesellschaft, 1891.

(²) Soc. vaud. sc. nat., 8 janvier et 5 mars 1890. Soc. phys., Genève 6 février 1890.

(³) Soc. vaud. sc. nat., 5 nov. 1890.

se pose à nous. Nous avons affaire à des faits anciens, remontant à des époques géologiques antérieures, sur lesquelles nous ne savons pas grand'chose. Ce que nous a appris l'étude du sol sur l'histoire de notre région est considérable à certains points de vue, est bien faible à d'autres. La somme des dates, données et faits, réunis par la science géologique, paléontologique et géographique suisse et cosmopolite dans les cent dernières années, est importante et réjouissante. Chacun de ces faits est un coup d'œil jeté dans un monde jusqu'alors inconnu, c'est une révélation d'un passé qui n'avait pas laissé d'histoire ; c'est une des glorieuses conquêtes de l'intelligence investigatrice de l'homme. Mais au milieu de ces points lumineux, que de points obscurs, que de lacunes, que d'inconnues et de points d'interrogation ! Pour un fait positif que nous possédons, c'est par centaines, c'est par milliers que se dressent les faits ignorés qui l'entourent et qui l'auraient expliqué. Nous sommes en présence d'un firmament étincelant d'étoiles ; mais que d'espaces obscurs séparent encore ces points lumineux ! Les données géologiques à notre disposition pour résoudre définitivement la question de l'origine du Léman sont absolument insuffisantes.

En second lieu, une question d'origine comme celle-ci est une question théorique, ce n'est pas une question de fait. Il s'agit de résumer les quelques données que nous ont léguées les géologues nos devanciers et de les agencer pour le mieux, de telle sorte qu'il n'y ait pas contradiction avec les lois générales de la science. Mais un fait nouveau que constatera l'observation de demain peut démolir tout notre échafaudage. Les théories de nos prédécesseurs ont toutes été renversées, en totalité ou partiellement ; ce sera peut-être aussi le sort de la nôtre. C'est surtout par des arguments négatifs que s'établissent et que se jugent les théories ; telle impossibilité qui avait échappé à l'auteur apparaît aux yeux de son critique. Bâtir une théorie sur des faits négatifs, n'est-ce pas terriblement chanceux ? Aussi réclamons-nous l'indulgence de nos lecteurs d'aujourd'hui, l'indulgence et la pitié de nos lecteurs du futur. Après avoir beaucoup réfléchi sur le problème qui, depuis trente ans, se dresse sans cesse devant moi, après avoir beaucoup hésité, après avoir pour un temps et successivement épousé sans scrupule l'opinion de mes divers prédécesseurs, après les avoir écartées, ces hypothèses, sous l'impression d'un argument qui m'a semblé décisif, après avoir vingt fois changé de théorie, je donne la ré-

ponse qui me paraît la plus plausible en 1891. Mais sur ce chapitre, comme sur tout autre, je me déclare disposé à m'instruire par l'expérience ; je suis prêt à me corriger devant l'étude de nouveaux faits ou de nouveaux raisonnements, prêt à accepter toute théorie qu'on me prouvera meilleure que celle que je défends. Il m'est souvent arrivé déjà dans ma carrière de naturaliste de modifier du tout au tout des opinions qui m'avaient d'abord paru fermement établies ; j'ai plusieurs fois eu le plaisir, que dis-je ? l'immense joie de me corriger moi-même et de changer de théorie sous les leçons de l'observation ou de l'expérience. Si je puis espérer me rapprocher un peu plus près de la vérité en réformant, ou spontanément ou sous les conseils d'autrui, ce qu'il y a d'erroné dans mes idées, je suis aussi prêt à le faire aujourd'hui que je l'étais hier ; j'espère être demain aussi disposé à apprendre que je sens l'être aujourd'hui. — Il serait un piètre naturaliste celui qui ne se laisserait pas instruire par les leçons de la nature ; le vrai naturaliste doit toujours être heureux d'abandonner la théorie qui lui paraissait la mieux assise si elle se heurte à quelque fait bien constaté ; il doit toujours être heureux s'il peut, d'une manière quelconque, se rapprocher de la vérité.

En troisième lieu, je constaterai que pour un problème dont les données sont aussi indécises que celui de l'origine du Léman, il est prudent de s'en tenir à des traits généraux et de ne pas vouloir essayer d'élucider chaque détail. Peut-être que dans les générations suivantes, quand nos successeurs auront accumulé cent et mille fois plus de faits spéciaux et généraux que nous n'en possédons actuellement, pourront-ils tenter de faire une histoire complète de la genèse de notre lac, sur des bases, hélas ! peut-être bien différentes de celles qui nous semblent possibles ou probables à la fin du XIXe siècle. Ecrire aujourd'hui cette histoire détaillée me semble une parfaite impossibilité.

Il va sans dire que, dans les pages suivantes, je n'ai pas la prétention de refaire toute l'histoire géologique de notre pays ; mon incompétence m'impose la plus prudente discrétion et je m'efforcerai de ne toucher qu'aux points qui me seront nécessaires pour la théorie de la genèse du lac. Si, par inadvertance, il m'échappe quelque solécisme géologique, que mes amis m'excusent et me corrigent ! je serai toujours disposé à m'instruire à leur expérience.

Enfin, je me donnerai comme règle dans cette recherche de l'origine du Léman de ne pas avoir devant les yeux uniquement les conditions

de notre lac, mais de considérer toujours en même temps les autres lacs, ses voisins de la région subalpine. Les lacs du pied des Alpes, les lacs de Thoune, de Brienz, des Quatre-Cantons, de Wallenstadt, de Zurich, ceux de la Savoie, ceux même de l'Insubrie de l'autre côté des Alpes, sont à beaucoup de points de vue dans des conditions tellement semblables, presque identiques, que toute théorie qui s'applique à l'un doit pouvoir, sans trop de peine, s'adapter aux autres. Ils sont évidemment de la même famille ; ils doivent avoir une origine analogue.

Encore un mot de généralités sur mes rapports avec mes prédécesseurs, ou mieux sur les rapports d'un naturaliste actuel avec ceux qui ont, avant lui, travaillé le même champ de la science. Une question comme celle qui nous occupe, déjà traitée par de longues générations de géologues, ne peut plus présenter de côtés absolument neufs ; toutes les faces du problème, toutes les solutions partielles, toutes les solutions d'ensemble ont déjà été indiquées et soutenues, quelques-unes par nombre d'auteurs. Cela étant, notre rôle, à nous qui venons après tant d'autres, semble n'être plus que celui d'un critique qui juge entre les opinions déjà proposées et se décide pour l'une d'elles. Réduite à ces conditions, notre tâche serait encore belle et utile, car une critique sérieuse demande autant et plus de connaissances que le simple énoncé d'une hypothèse ; pour cette dernière il suffit de mettre en jeu l'imagination, pour la première le jugement est indispensable. Mais notre travail, à nous tard-venus, peut être plus personnel et, par suite, plus attrayant ; nous pouvons refaire nous-mêmes l'ouvrage de nos devanciers, nous poser les problèmes en nous basant sur les faits connus actuellement et leur trouver nous-mêmes les solutions qui nous paraissent justes. Je ne dis pas que, dans ce cas, l'imagination joue un rôle aussi original, aussi prédominant que dans les âges primitifs de la science ; nous avons lu les œuvres de nos ancêtres scientifiques et nous héritons de leurs labeurs ; consciemment ou inconsciemment (ce dernier cas serait le plus fréquent si j'en juge par mon expérience personnelle), les solutions qu'ils ont trouvées se présentent facilement à notre esprit, et nous avons le choix entre de nombreuses réponses au problème. Mais le travail d'élaboration nous reste propre et nous comprenons mieux ce que nous avons déduit nous-mêmes. Notre devoir, ce travail d'appropriation accompli, sera évidemment de rendre hommage à qui de droit des théories et

raisonnements déjà énoncés avant nous, d'en rapporter l'honneur aux premiers auteurs qui ont eu le mérite de les découvrir ; mais, ce devoir rempli, nous avons la satisfaction d'avoir fait une œuvre personnelle et notre collaboration sera utile en servant de confirmation aux travaux de nos prédécesseurs. — Dans nombre de théories qui remplissent ce volume, j'ai suivi cette méthode ; j'éprouvais le besoin de m'exprimer là-dessus une fois pour toutes ; il sera inutile d'y revenir dans chaque cas spécial. (1)

Nous avons établi qu'au point de vue de leur origine, les lacs doivent être séparés en un nombre considérable de types divers ; quelques-uns n'ont évidemment rien à faire avec la genèse du Léman, et nous pouvons, sans autre, les laisser de côté dans notre recherche. Le Léman n'est ni un lac volcanique, ni un lac d'érosion éolienne, ni un lac de barrage par éboulement d'une montagne, etc., etc. Nous ne nous occuperons que des possibilités immédiates et plausibles et notre discussion comprendra trois parties : J'écarterai d'abord les théories orographiques ; puis les théories de l'excavation glaciaire ; enfin, par élimination, j'arriverai aux théories de l'érosion aqueuse. Après avoir ainsi pris position et établi que, dans mon opinion, la vallée du Léman a été creusée par le Rhône tertiaire, j'aurai à chercher quelles sont les causes possibles de la stagnation des eaux. Tel sera l'ordre de mon exposé.

Des faits relatés au chapitre précédent, nous retiendrons avant tout ceux qui nous ont appris l'âge géologique de l'origine du Léman ; ils nous serviront de base dans cette étude. Nous avons constaté : premièrement que le lac n'existait pas encore à l'époque miocène moyenne, secondement qu'il existait déjà à l'époque diluvienne ou pleistocène. C'est donc entre ces deux dates que se place le creusement du bassin du Léman. Toute hypothèse sur la genèse du Léman devra répondre à cette condition fondamentale.

Pour ce qui regarde la date limite la plus rapprochée de nous, c'est par excès de prudence que je parle de l'époque pleistocène (glaciaire). Je suis convaincu que la vallée était déjà creusée lorsque les conglo-

(1) Ces lignes, écrites en janvier 1890, alors que je venais d'établir sur mes idées personnelles la genèse du lac Léman, ont reçu, par la constatation que j'ai faite quelques mois plus tard de la priorité de Ch. Lyell, une application que je ne prévoyais ni si immédiate ni si directe.

mérats de la Drance et de Bougy ont été déposés par des torrents latéraux venant se perdre sous le grand glacier qui remplissait le fond du bassin ; je suis convaincu que les alluvions anciennes de Genève étaient des dépôts du torrent puissant qui sortait devant le front du grand glacier. La nature des galets et leurs caractères me le prouvent. Je suis donc persuadé que le lac était déjà creusé à l'époque de l'alluvion ancienne et je devrais dire que la date du Léman est antérieure à cette époque. Mais, pour n'écarter personne dans cette discussion préliminaire, je préfère prendre un terme plus large, plus élastique et je me contente d'affirmer que le lac était certainement creusé avant la fin de l'époque glaciaire ; les dépôts glaciaires dans le domaine du lac en sont la preuve indiscutable.

I. L'origine du lac Léman doit-elle être cherchée dans les faits orographiques ? Son bassin a-t-il été formé par un plissement des assises géologiques ou par une rupture des couches lors des plissements orogéniques qui ont donné à notre pays sa structure générale actuelle? Ou encore, en précisant plus nettement, est-il dû aux soulèvements et plissements des Alpes antérieures, de la plaine mollassique et du Jura qui ont eu lieu à la fin de la période miocène? Nous savons qu'à cette époque le relief de la contrée a été puissamment bouleversé, qu'il a été considérablement soulevé au-dessus de son niveau primitif qui, à l'âge helvétien, était celui de la mer, que la chaîne des grandes Alpes a été énormément exhaussée, que les Alpes antérieures ont été pliées en une série de chaînes parallèles, que les plis du Jura se sont accentués. Ces bouleversements ont-ils produit, par action directe ou par réaction, une vaste excavation qui serait le bassin du Léman ?

A cette question, je répondrai par la négative, en me fondant sur les arguments suivants :

1° Tout d'abord, un argument général qui s'adresse à la genèse de tous les lacs subalpins (*Randseen* de Rütimeyer) du nord des Alpes centrales. Tous ces lacs, lac du Bourget, d'Annecy, Léman, lacs de Brienz et de Thoune, des Quatre-Cantons et de Zoug, de Wallenstadt et de Zurich, lac de Constance, sont dans des conditions analogues et doivent avoir eu la même origine. Ils appartiennent tous à la même famille. Tous situés dans de grandes vallées à leur sortie des Alpes antérieures, ou en continuation de ces vallées, ils sont intimément liés à la structure et à l'origine de celles-ci. Or, pour quelques-unes de ces vallées, leur nature semble certaine; ce sont des vallées d'érosion.

Les cluses, ces puissants sillons établis perpendiculairement aux plis des couches géologiques, ont été pendant longtemps attribués à des ruptures, à des fractures orographiques ; mais l'étude attentive et générale des faits a amené de plus en plus à la notion qu'elles sont dues à l'érosion progressive des eaux, qu'elles sont des vallées d'érosion. Or, si les vallées qui descendent dans quelques-uns de ces lacs, vallée de l'Aar, vallée de la Reuss, par exemple, sont des cluses, vallées d'érosion, les bassins des lacs qui continuent directement ces vallées ne sauraient être des creux orographiques. Si quelques-uns de nos lacs échappent à l'origine orographique, comme tous ont un caractère général identique, il est probable qu'ils ont tous une genèse analogue et qu'ils ne sont pas des lacs orographiques.

2° La complication de la structure géologique du Léman m'engage à écarter pour lui l'hypothèse orographique. En effet, un lac orographique doit être presque nécessairement un lac simple : le bassin d'un lac orographique est logé dans le vallon d'une synclinale, ou dans la combe d'une anticlinale ou d'une isoclinale, ou dans une dépression du pays, ou derrière un soulèvement local ; exceptionnellement, si la contrée est très submergée, il peut y avoir communication latérale entre des bassins différents, parallèles les uns aux autres. Mais tel n'est pas le cas pour le Léman. En suivant les leçons des auteurs de l'hypothèse orographique, Desor, A. Favre, entr'autres, on est obligé de trouver des explications différentes pour les sections successives du même lac : le Léman est, d'après eux, un lac composé. Le Haut-lac est une cluse perpendiculaire aux chaînons des Préalpes et, comme tel, il aurait pour origine, dans l'hypothèse orographique, une faille, une solution de continuité dans un plan vertical, à angle droit des plis des montagnes. Le Grand-lac est situé à la limite entre les terrains miocènes de la côte suisse et les chaînes des Alpes chablaisiennes ; il serait donc une combe, une vallée isoclinale parallèle aux Alpes, une solution de continuité due au soulèvement des Préalpes, les couches de la plaine étant restées horizontales. Le Petit-lac est bordé des deux côtés par les assises de la mollasse que Favre supposait se continuer par dessous le lac. Il serait donc dû à une dépression synclinale des couches miocènes.

On est donc entraîné, dans l'hypothèse orographique, à donner trois explications différentes pour les trois régions du même lac, à faire intervenir des forces causant une disjonction des couches, ici perpen-

diculairement, là parallèlement aux poussées, et plus loin n'amenant qu'un simple plissement sans rupture. Que, dans des bouleversements comme ceux qui ont accompagné les grands phénomènes orogéniques de la fin de l'époque miocène, il puisse y avoir une complication d'actions aussi opposées, c'est peut-être admissible. Mais ce qui ne l'est pas, c'est que ces différentes crevasses, ruptures ou plissements, d'ordre si disparate, arrivent à produire un bassin unique, en continuité directe dans ses diverses parties, un seul lac comme le Léman. Ah! si notre lac était aussi bizarrement contourné et accidenté que le lac des Quatre-Cantons, je n'aurais pas d'objection immédiate à admettre une telle complication d'origine; mais qu'un seul et même bassin comme le Léman soit le résultat d'une combinaison d'actions aussi opposées, ce n'est pas plausible. Et cependant, quand on s'en tient à l'hypothèse orographique, on est forcé d'y souscrire.

3° Quoi qu'il fût bien difficile de comprendre comment des modes de formation si divers auraient pu se juxtaposer à de si courtes distances, comment des tensions, distensions, soulèvements et affaissements des couches, auraient pu, les uns à côté des autres, produire des effets si différents dans des régions si voisines, on pouvait encore les admettre tant qu'on ne possédait pas la carte hydrographique du lac. Mais celle-ci est venue donner le coup décisif à l'hypothèse orographique. Elle a montré qu'il y a continuité dans la formation du lac; que tout le Grand-lac est certainement l'effet d'une seule et même action, car il n'y a à la jonction des diverses formations aucune solution de structure, aucun accident reconnaissable; les talus et le plafond se suivent sans saut, sans faille, sans déplacement latéral ou vertical. Pour qui ne connaîtrait pas la carte géologique de la côte, il ne saurait retrouver dans la carte hydrographique le lieu où se fait le passage d'une formation à l'autre.

Le seul point où il y ait changement d'allures est aux limites du Grand et du Petit-lac. Mais là encore nous avons constaté que le second est la continuation directe du premier, que la rampe ascendante du plafond du Grand-lac vient aboutir au col de la barre de Promenthoux et se continue en ligne directe dans le plafond du Petit-lac. Si, sur la carte moderne, les côtes se rapprochent dans un détroit de Promenthoux et si le fond se relève dans une barre de Promenthoux, nous avons constaté que les murailles du lac doivent échapper presque absolument à cet étranglement; que celui-ci est presque unique-

ment formé d'un revêtement superficiel de terrains quaternaires; que le lac primitif, malgré ce point qui semble actuellement critique, était un bassin d'un seul jet et d'une même venue.

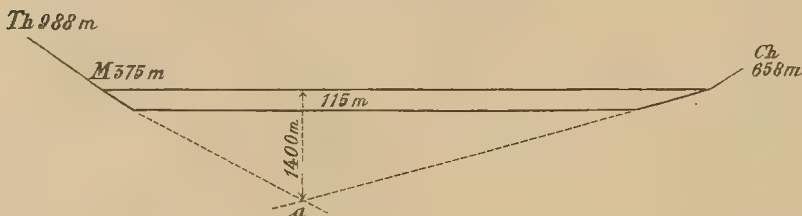
On m'objectera peut-être que je néglige l'action des glaciers. Les actions orographiques qui ont creusé le bassin du Léman ont déterminé des ruptures de roches, des crevasses compliquées, qui donnaient au lac primitif un relief probablement fort accidenté. Mais les glaciers sont survenus qui ont poli, égalisé, usé les parties saillantes, et ont transformé ces parois déchirées en une vallée uniforme et régulière. Cette riposte ne me convainc pas. Je reconnais les effets d'aplanissement des glaciers, ils sont incontestables; mais je constate en tant de points, soit dans les vallons des glaciers actuels, soit dans les vallées parcourues jadis par les grands glaciers quaternaires, des parties saillantes, des éperons qui ont résisté à la puissante lime, au gigantesque rabot des glaces en mouvement, que je demande à ne pas exagérer leur action. Je rappellerai simplement, à nos géologues suisses, l'éperon mollassique de la gare de Renens, ou le cap de calcaires aquitaniens de la pointe de St-Sulpice; ils montrent combien les glaciers ont laissé de parties saillantes, même en des terrains remarquablement friables, même au point où leur action devait être au maximum; les deux localités que je cite sont en effet précisément dans l'axe de la vallée du Rhône; c'était là que le glacier devait venir frapper avec le plus d'énergie.

L'étude de la carte hydrographique du lac Léman a jugé la question de l'origine orographique du bassin. Elle m'a définitivement décidé pour la négative.

4° Un dernier argument, et je m'en tiendrai là. La forme et les grandeurs du profil en travers du lac parlent énergiquement contre l'hypothèse orographique.

La coupe en travers du Haut-lac nous donne une vallée de 8^{km} de largeur, à talus inclinés de 15 à 30 $^0/_0$, coupés par un plafond horizontal dans sa section transverse. Ce plafond est formé par le remplissage des alluvions du Rhône; nous pouvons le supprimer par l'imagination et supposer les talus se continuant en profondeur jusqu'à leur rencontre à mille ou quinze cents mètres sous la nappe du lac. La figure 30 donne à l'échelle du 100 000e, le profil du lac entre le signal de Chexbres (Ch) d'une part, et Meillerie (M) et Thollon (Th) d'autre part. Il est bien difficile d'y voir les traits d'une vallée de fracture; le point *a*

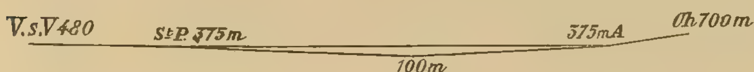
de rencontre des talus est à 1400m de profondeur sous la nappe du lac. Et cela, d'autant plus que cette vallée est par sa position géographique une cluse ; elle est établie perpendiculairement aux plis des chaînes parallèles des Préalpes. Or, dans ces circonstances, il ne se produit, par les actions de poussée qui déterminent le relief des plissements, aucune pression capable de faire bailler les lèvres d'une crevasse orientée comme une cluse ; à supposer qu'une faille se développe dans ce



(Fig. 30.) Profil du Haut-lac ; signal de Chexbres, Meillerie et Thollon. 1 : 100 000e.

sens, ses deux parois resteront accolées et ne s'écarteront pas. En tous cas, si par suite de quelque distorsion anormale elles cessaient d'être adjacentes, elles ne laisseraient pas entre elles un joint largement béant de 8km de largeur, et s'ouvrant suivant un angle obtus de 165°.

Dans la partie occidentale du Grand-lac, le profil en travers exclut, plus encore que dans le Haut-lac, l'hypothèse d'une formation du bassin par rupture des couches. Ici nous n'avons point affaire à un comblement du plafond par de puissantes alluvions fluviatiles ; les talus viennent se rejoindre sur le fond du lac suivant un angle très obtus ; nous avons les murailles du lac presque à nu sous leur mince revêtement d'alluvion lacustre impalpable. Le profil Villars-sous-Yens (V.s.Y) St-Prex, (St-P.) Amphion (A), Champange (Ch), à l'échelle de 1 : 200 000e fig. 31 n'a aucunement les allures d'une fracture orographique du sol.



(Fig. 31.) Profil du Grand-lac ; Villars-sous-Yens, St-Prex, Amphion, Champagne. 1 : 200 000e.

Qui voudrait chercher dans un tel relief les lèvres béantes d'une vallée anticlinale ou isoclinale ? Qui voudrait admettre que nous ayons là le produit d'une rupture violente des couches du sol ?

Il me paraît que ces profils en travers du lac, réduits à leurs dimensions proportionnelles, sont d'une démonstration absolument décisive contre les hypothèses orographiques.

II. L'origine du lac doit-elle être cherchée dans des faits d'excavation par les glaciers? J'ai exposé plus haut les raisons qui m'empêchent d'adopter l'hypothèse glaciaire. L'observation des faits actuellement constatables dans les glaciers ne nous a jamais montré l'excavation du lit d'une vallée en forme de cuvette ; la théorie de l'érosion glaciaire, telle que nous pouvons la construire en nous basant sur les faits d'expérience, nous fait voir l'impossibilité de creusement d'un bassin de lac.

Ce n'est pas sans une vive lutte que je suis arrivé à cette conviction ; ce n'est pas sans regret que je me prononce contre cette hypothèse. Elle répond si bien aux faits géographiques, elle explique si facilement la distribution des lacs dans les régions subalpines de tous les territoires montagneux, elle est si simple et nécessite si peu de complications théoriques, d'hypothèses accessoires, et d'interprétations secondaires ; elle satisfait si élégamment à l'histoire générale et locale des lacs, que ce n'est qu'à mon corps défendant que j'y renonce. Le jour où on me prouverait qu'il y a des cuvettes de lacs [1] sous les glaciers alpins actuels ou sous l'inlandsis du Groënland, ce serait avec joie que je la reprendrais. Mais les faits à moi connus m'empêchent de l'adopter, et je ne saurais forcer ma conviction, quelque simplification que cela dût apporter à nos études. Il serait certes bien plus commode pour celui qui doit tracer l'histoire ancienne du lac Léman que les choses aient pu se passer comme le suppose l'hypothèse de l'excavation glaciaire ; mais elles n'ont pas suivi cette marche. Nous devons donc chercher autre chose, et mieux.

III. Les hypothèses de genèse du Léman par phénomènes orographiques ou par excavation glaciaire étant écartées, nous n'avons plus devant nous que l'hypothèse de l'érosion aqueuse. Voici dans quels termes elle se présente. Par suite de variations partielles et locales de l'altitude de la contrée, dans une première phase le Rhône aurait creusé sa vallée à un niveau relatif fort inférieur à son plafond actuel, et l'aurait amenée à former un plan incliné correspondant au plafond de

[1] Je dis des lacs, de véritables lacs d'excavation, et non pas simplement quelque petit étang dû au plissement accidentel d'une couche plus dure ou quelque marmite de géant creusée par la cascade d'un moulin du glacier.

la plaine centrale du lac. Dans une seconde phase, des nouvelles variations d'altitude auraient transformé cette vallée descendante en un bassin avec contrepente où les eaux seraient devenues stagnantes et auraient formé le lac, ou bien par soulèvement du cours inférieur de la vallée, ou bien par affaissement de son cours supérieur, ou peut-être par un double mouvement en sens inverse.

Cette hypothèse, qui fait du Léman un lac mixte, me paraît la plus plausible ; je vais la développer en en analysant les conditions.

A. Je commencerai par établir la probabilité de l'existence d'une grande vallée d'érosion.

1° Que des variations générales d'altitude aient eu lieu dans notre contrée dans les époques géologiques pendant lesquelles s'est produite la genèse du Léman, c'est ce que nous apprend l'histoire du pays. A l'époque miocène moyenne, la plaine suisse était encore au-dessous du niveau de la mer : les mollasses helvétiennes sont des alluvions marines. Depuis la fin du miocène moyen le pays s'est soulevé d'au moins cinq cents à mille mètres, de plus de 1200^{m} au Gibloux, 1800^{m} au Righi, 1954^{m} au Speer. Depuis cette époque, en l'absence de dépôts marins nous n'avons plus d'indications directes sur les variations d'altitude ; ce n'est que par des inductions que nous arrivons à en supposer quelques-unes. Mais rien ne s'oppose à l'admission de ces phénomènes, et nous sommes en droit de les faire entrer dans nos hypothèses.

2° Que ces variations d'altitude n'aient pas eu toujours et partout un caractère d'ensemble et d'uniformité absolue, que certaines régions aient été plus soulevées et d'autres moins, que certaines parties se soient soulevées pendant que d'autres s'affaissaient, c'est ce qui est prouvé dans notre pays pour l'époque miocène ; les divers étages du tertiaire moyen, les uns d'eau douce, les autres d'eau saumâtre, les autres d'eau marine, ne sont pas uniformément étalés sur la généralité de la plaine suisse ; les uns ou les autres font défaut par place ; de fortes inégalités locales sont évidentes dans les allures de ces variations. Rien ne s'oppose à ce que nous admettions que dans les âges subséquents il y ait eu, de même, défaut d'uniformité, qu'il y ait eu des inégalités locales dans les variations d'altitude.

Les conditions générales de l'hypothèse, la possibilité de variations locales dans l'altitude du pays sont donc parfaitement acceptables.

3° Le creusement par érosion aqueuse d'une grande vallée du Rhône, poussée à un niveau inférieur au plafond actuel de la vallée,

comment peut-il s'entendre ? Nous supposons que le fleuve du Valais s'est, dans les âges géologiques du miocène supérieur et du pliocène, écoulé en pente régulière et continue, sans contrepente ni bassin lacustre intercalé, depuis ses sources dans les Alpes valaisannes et bernoises jusqu'à la mer ; qu'il a érodé le plafond et attaqué les talus latéraux de sa vallée, en la creusant, sur une partie importante de son cours, notablement plus bas qu'elle ne l'est actuellement. Le plafond de cette vallée primitive formait un plan incliné continu ; il a plus tard été bouleversé par des soulèvements ou affaissements partiels ; il a été recouvert en partie par des alluvions déposées ultérieurement ; il est resté à découvert et à peu près intact, sauf les conditions de niveau et de pente, dans la partie occidentale du plafond du lac.

4° Une question préjudicielle se pose à nous : De quand date le Rhône ? Quand a-t-il commencé à couler et à éroder sa vallée ? Où était sa vallée au début de son origine ? D'après les notions de la géologie moderne, il semble qu'on doit y répondre : Le Rhône date de la première émergence des terres qui ont apparu dans la région. Dès qu'il y a eu terre ferme, il y a eu des pluies, il y a eu écoulement des eaux, il y a eu formation de ruisseaux, de rivières, de fleuves qui se sont creusé, par érosion, des ravins. Une fois le premier ravin établi, il s'est perpétué sur place ou à peu près, tantôt s'approfondissant et s'élargissant, tantôt se comblant par des alluvions, mais sans dévier sensiblement son cours et sa direction.

Au début des temps géologiques, lorsque les Alpes étaient à peine soulevées et que les Préalpes n'étaient pas encore pliées, où coulait le Rhône des époques secondaires ? Y avait-il déjà un Rhône ? Cela importe peu. Mais à mesure que les Alpes s'élevaient, à mesure que les plissements des Alpes antérieures accidentaient toujours plus le terrain, un Rhône tertiaire, pour ne pas remonter plus haut, a commencé et continué à couler dans sa vallée. Il poursuivait son œuvre d'érosion et approfondissait et élargissait son ravin à mesure que le terrain se soulevait davantage. Jamais son action n'a été interrompue, jamais ses eaux n'ont été arrêtées par un soulèvement brusque ou brutal d'une partie de son lit ; il a toujours, année après année, continué lentement et sûrement son œuvre d'érosion ; toujours l'eau courante a sapé les parois de la vallée ; les flancs de celle-ci se sont éboulés, et réduits en poussières ils ont été charriés à l'état de graviers et d'alluvion impalpable par le Rhône miocène, puis par le Rhône pliocène, puis

par le Rhône quaternaire. A l'époque glaciaire, le grand glacier du Rhône, qui réunissait dans son courant de glace de plus de 1000^{m} d'épaisseur l'ensemble des glaciers du Valais, est venu polir les parois de la vallée, raboter les angles saillants, combler de boue glaciaire et de détritus morainique les creux et les angles rentrants. En même temps, sur les parties latérales de la vallée principale, les eaux courantes à la surface du sol, ainsi plissé et soulevé, faisaient aussi leur œuvre d'érosion ; elles attaquaient les points de plus faible ténacité, et suivant les failles, les ruptures et les dislocations, elles creusaient les vallées secondaires, transversales dans les Alpes principales, longitudinales dans les Alpes antérieures, qui débouchent dans le ravin du fleuve collecteur, en constituant les vallées affluentes.

Il y a donc eu de tous temps, depuis la première émergence de la terre dans la région des Alpes, un Rhône, une Drance, une Arve, etc., un Rhône secondaire (?), un Rhône tertiaire, à peu près dans les mêmes lieux et avec le même cours que le Rhône moderne. Son embouchure dans la mer, et par suite la longueur de son cours, variaient en revanche avec l'état de soulèvement du continent : quand la mer déposait les assises des Préalpes, il n'y avait encore qu'un Rhône valaisan : quand la mer miocène remplissait la plaine suisse, son embouchure était à la sortie de la cluse du bas-Valais ; quand la mer pliocène s'était reculée jusqu'à Lyon, le Rhône traversait le Jura ; le Rhône quaternaire allait jusqu'à Arles.

A l'époque où, dans l'histoire géologique, nous devons placer l'établissement du bassin du Léman, il y avait donc déjà un Rhône, nous pouvons sans hésitation le faire intervenir dans nos spéculations.

5° La vallée actuelle du Rhône valaisan présente, dans la plus grande partie de son cours les caractères d'une vallée autrefois plus profonde et comblée en partie par des alluvions. Je déduis cela de deux faits :

a De l'absence de tout seuil rocheux depuis l'embouchure de la Massa, au-dessus de Brigue, jusqu'au lac Léman. Dans ce long parcours de 110^{km}, le plafond de la vallée est tout entier recouvert d'alluvions modernes. Nulle part on n'y voit la roche en place ; aucun seuil rocheux n'y apparaît. Ni dans les rapides de l'Illgraben près de la Souste, ni dans ceux du Bois-noir entre le Trient et St-Maurice, ni dans la cluse

étroite de St-Maurice, [1] il n'y a traces de bancs de rochers visibles dans le lit du fleuve.

b De la largeur de la vallée. Creusée tout entière dans des roches dures ou très dures, la vallée du Rhône est vaste et spacieuse; de Sierre à St-Maurice, son plafond a une largeur de 1 à 2^{km}, de St-Maurice au Léman de 3 à 5^{km}. Il est vrai qu'il y a possibilité à ce que l'élargissement d'un ravin de vallée soit dû au développement de méandres du fleuve divaguant latéralement; mais une telle action atteindrait difficilement à une si belle régularité. Il est d'une autre part beaucoup plus plausible d'attribuer la très grande largeur de la vallée du Rhône, sa largeur uniforme surtout, à un comblement ultérieur par des alluvions.

Le plafond primitif de la vallée du Rhône est enfoui sous quelques centaines de mètres d'alluvion et ses talus émergés se continuent sous cette alluvion par des talus enterrés, lesquels viennent se rejoindre sur un plafond étroit. A ma connaissance, jamais des puits creusés dans la vallée du Rhône valaisan ne sont arrivés sur la roche en place, à une seule exception près, celle du puits de la source thermale de Lavey. Dans ce puits l'on a trouvé la roche en place (roc feldspathique micacé, carbonifère métamorphique) à l'altitude absolue 409.58^{m} soit à 16.7^{m} sous la surface du sol. Mais cette localité est si près du bord de la plaine que je n'hésite pas à dire que la roche représente le talus et non le plafond des murailles de la vallée.

6° La région du Haut-lac et la plaine centrale des grandes profondeurs du Léman présentent des faits analogues; le relief de la vallée primitive y est masqué par le cône d'alluvion grossière et impalpable du Rhône. Ces parties sont la continuation de la plaine du Rhône et les murailles de la vallée doivent y avoir des allures semblables.

7° A partir de la plaine centrale du Léman, la rampe ascendante du Grand-lac et le Petit-lac doivent au contraire nous donner, à peu de chose près, le relief intact de la vallée primitive. Les revêtements d'alluvion glaciaire et lacustre altèrent légèrement ces surfaces, mais, sous ce revêtement, les traits généraux sont faciles à deviner. Le plan in-

(1) Cette dernière localité semblait la plus suspecte à ce point de vue. J'ai été l'étudier le 29 décembre 1885 par un jour d'hiver, alors que le Rhône était bas et ses eaux assez limpides pour permettre une vue suffisante du fond de son lit. Je n'y ai vu que graviers et alluvions, pas trace de roche en place.

cliné descendant vers la mer a été changé, par des soulèvements ou affaissements locaux, en une rampe ascendante formant contrepente, mais sauf cette modification, considérable il est vrai, cette partie nous donne l'ancien lit du Rhône primitif.

8° Par où passait au-delà de la région actuelle du Léman, pour arriver à la mer, ce Rhône pliocène qui, dans notre hypothèse, a creusé le bassin du lac ? A cette question une première réponse a été donnée par M. L. Rütimeyer. (1)

Dans son mémoire sur la genèse des vallées et des lacs, M. Rütimeyer a émis, au sujet de l'écoulement primitif du Rhône au-delà du lac Léman, une hypothèse originale et intéressante. Après avoir reconnu que les Alpes, les Préalpes et la plaine suisse au nord d'Oron ont été drainées par de profondes vallées venant se déverser dans un canal collecteur situé au pied du Jura et emportant les eaux dans la direction du nord-est, il a supposé que le Rhône en faisait autrefois autant ; qu'il s'écoulait par la vallée de la Venoge, la cluse d'Entreroches, la plaine de l'Orbe, le lac de Neuchâtel, etc. ; que plus tard la cluse du Vuache, auparavant fermée, aurait été percée en même temps qu'un soulèvement local de la colline du Mormont aurait obstrué le canal d'Entreroches ; le Rhône, détourné de son cours primitif vers le nord, aurait surmonté la digue formée par le Jura au fort de l'Ecluse, et aurait commencé à éroder ce qui est devenu la cluse du Vuache. Le Petit-lac, le cours actuel du Rhône de Genève à Bellegarde, seraient ainsi de formation secondaire et postérieure.

Cette hypothèse hardie paraît au premier abord concorder fort bien avec certains faits. C'est avant tout l'existence dans la colline du Mormont d'une cluse très évidente ayant manifestement donné passage à une rivière ou un fleuve. En second lieu, la direction de trois rivières du pied du Jura, le Nozon, la Venoge et le Veyron, qui, dans la partie supérieure de leur cours, marchent visiblement vers le N.-E., et tendent à se rendre vers le lac de Neuchâtel ; si plus bas elles arrivent partiellement ou en totalité à se déverser dans le Léman, c'est en faisant un coude brusque, et un changement évident de direction. C'est enfin la structure du Petit-lac Léman sur laquelle nous allons bientôt revenir.

Une première objection que l'on peut faire à cette hypothèse est

(1) Thal- und Seebildung, p. 74.

tirée du relief en creux du Léman. La carte hydrographique nous a appris que le bassin du Grand-lac ne s'arrête ni à St-Sulpice ni à Morges, mais qu'il continue sans interruption, arrêt ou déformation jusqu'à Promenthoux et Yvoire ; devant Rolle il y a encore des profondeurs de 150m. Il n'y a aucune limite évidente, ni sur les talus ni sur le plafond du lac, correspondant à la vallée de la Venoge. Cette partie du lac ne s'expliquerait pas dans l'hypothèse de Rütimeyer.

Il en est de même du Petit-lac. J'avoue ne pas comprendre comment il peut avoir été creusé, en admettant que le Rhône, détourné dans la direction du Vuache, en aurait approfondi la cluse par une action secondaire. Le Petit-lac a devant Nyon des profondeurs de 70m au-dessous du seuil de Genève. Comment mon honorable collègue de Bâle en explique-t-il l'érosion ?

Il est vrai que j'y suis arrivé en complétant sur un point l'hypothèse de Rütimeyer, et en faisant intervenir l'Arve. Si nous admettons que la cluse du Vuache était fermée, et que le Rhône s'écoulait par la vallée de la Venoge et Entreroches dans le lac de Neuchâtel, il nous faut trouver un dégorgeoir pour la grande vallée du Mont-Blanc. L'Arve devait se déverser quelque part, et l'on peut se figurer cette rivière faisant un coude à Genève vers le nord-est, parcourant le Petit-lac en le creusant, parcourant la partie occidentale de la région du Grand-lac, et venant se joindre devant St-Sulpice au Rhône pour s'écouler avec lui par la vallée de la Venoge dans le lac de Neuchâtel. Le Petit-Lac, la partie occidentale du Grand-lac seraient vallée d'érosion de l'Arve, la partie orientale du Grand-lac serait vallée d'érosion du Rhône. Il n'y aurait donc pas là difficultés insurmontables à accepter l'hypothèse de Rütimeyer.

Mais, et c'est là ce qui m'arrête absolument, la vallée de la Venoge est beaucoup trop étroite pour que l'on puisse la supposer être le reste d'une grande vallée fluviale, ayant reçu un puissant fleuve comme le Rhône, augmenté encore d'un bon tiers par le confluent de l'Arve. Les dimensions actuelles de la vallée correspondent parfaitement à celles de la petite rivière qui y circule ; rien n'indique qu'elle ait jamais été beaucoup plus large qu'actuellement.

Il est vrai que sur les flancs de cette vallée les assises miocènes sont bien rarement en évidence, et qu'elle est presque partout creusée dans un revêtement de terrains glaciaires ; il est vrai encore que sur toute sa longueur, depuis Eclépens jusqu'au lac, on ne voit dans le lit de la

Venoge aucun seuil rocheux qui prouverait que le plafond de la vallée n'aurait jamais été poussé plus bas. Mais le géologue qui la parcourt actuellement juge bientôt qu'elle n'a jamais été le lieu d'une large et profonde vallée comme celle du Rhône, vallée dont la profondeur aurait été, dans les hypothèses que nous discutons, intermédiaire entre celle du Léman et celle du lac de Neuchâtel. Nous savons, par l'exemple du Léman, les dimensions que prend une vallée d'érosion dans les mêmes terrains mollassiques où est creusée la vallée de la Venoge ; là où cette vallée a 600 et 700^{m} de profondeur sous les arrière-bords, comme dans le Grand-lac, elle mesure 25 à 30^{km} de largeur, d'un sommet à l'autre de ses digues latérales ; là où sa profondeur est plus faible, comme dans le Petit-lac, elle a encore 8 à 10^{km}. Or la vallée de la Venoge mesure 1 à 2^{km} à peine de largeur ; à son débouché dans le lac, nous connaissons des roches miocènes en place sous Préverenges, à St-Sulpice, à la gare de Renens ; nous ne savons où trouver à loger entre ces points une vallée capable de recevoir le Rhône, coulant à 300 ou 400^{m} plus bas dans des terrains mous, mollasses et marne, qui s'éboulent ou se disloquent très facilement.

Du reste, quand on cherche comment cette vallée aurait été comblée, on se heurte à des difficultés insurmontables. C'est à des terrains glaciaires qu'il faut avoir recours pour expliquer ce comblement. Mais l'expérience nous apprend que les glaciers s'écoulent dans la vallée principale et ne la comblent pas ; qu'ils peuvent parfois barrer des vallées latérales, mais que dans la vallée principale ils se bornent à laisser leurs moraines frontales pendant leur phase de décrue. Or dans l'hypothèse de Rütimeyer, la vallée de la Venoge, alors vallée du Rhône, devait être la vallée principale, et c'est par son canal que devait s'écouler le cours dominant du grand glacier.

Quant à l'absence de seuils de roche en place dans le lit de la Venoge, nous verrons plus loin qu'elle s'explique fort bien en supposant que la Venoge, comme l'Aubonne, le Boiron, etc., était déjà un affluent du Rhône à l'époque où celui-ci n'était pas encore transformé en Léman et coulait à ciel ouvert sur le plafond actuel du lac.

Je ne vois pas du reste de raisons graves nécessitant la complication d'hypothèses qui feraient passer le Rhône par le lac de Neuchâtel avant qu'il ait été jeté dans la cluse actuelle du Vuache. Aucun fait de géologie générale ou locale ne m'y conduit.

Je sais bien qu'il y a un point inexplicable dans l'histoire primitive

du Rhône : le voici : Les derniers lambeaux connus d'une mer miocène dans le bassin du Rhône sont ceux du Mont sur Lausanne, d'une part, et de Bellegarde, d'autre part, tous les deux de l'époque helvétienne, tous les deux contemporains. Il est incontestable que le Rhône de ces temps venait se verser dans la mer ; il semblerait probable qu'il cherchait la mer la plus rapprochée. A moins de supposer que la mer miocène moyenne se soit continuée dans la partie occidentale des cantons de Vaud et de Genève jusqu'au-delà de Bellegarde, et que toutes les mollasses marines déposées dans ce bras de mer auraient été enlevées par des érosions postérieures sans laisser aucune trace, aucun lambeau témoin, — supposition presque inacceptable, il faut l'avouer — la mer la plus rapprochée de la cluse du bas Valais était évidemment le golfe de Moudon, le Mont sur Lausanne. Pourquoi, dans les soulèvements qui ont relevé la contrée au-dessus de la mer, et ont fait écouler la mer miocène dans la direction du nord-est, pourquoi le Rhône n'a-t-il pas suivi ce chemin ? Pourquoi n'a-t-il pas creusé son ravin dans la ligne Moudon, Payerne, le lac de Morat ? Pourquoi s'est-il détourné en suivant l'axe occidental du lac pour arriver à Genève et Bellegarde ? J'avoue ne pas le comprendre, et je n'espère pas y arriver jamais. Je constate que le Rhône actuel n'est pas un affluent du Rhin ; j'admets qu'il est devenu fleuve méditerranéen dès la fin de l'époque miocène. Mais je ne sais pas pourquoi et je renonce à l'expliquer. Nous devons être des agnostiques en géologie aussi bien que dans tant d'autres branches de nos recherches, et savoir nous incliner devant les problèmes insolubles à notre connaissance limitée.

D'ailleurs, pour en rester avec l'hypothèse de Rütimeyer, si l'existence de la cluse d'Entreroches semble bien indiquer le passage d'une rivière, ne serait-il pas plus simple d'y faire écouler le lac de Neuchâtel que le Léman ? Si l'on considère le plafond des deux lacs du pied du Jura, on voit que celui de Neuchâtel est à la cote 282^{m}, que celui du lac de Bienne est à 356^{m}, que, par conséquent, le plan incliné de ces deux survivants d'un fond de vallée penche vers le Rhône. Je serais plutôt attiré vers cette supposition, si j'avais le temps de l'étudier et si cela ne m'entraînait pas trop loin de la genèse du Léman. — Il est vrai que je serais encore arrêté par le peu de largeur de la vallée de la Venoge ; mais l'argument aurait beaucoup moins de gravité si je n'avais à y faire écouler, et à un niveau relativement peu profond, qu'une rivière aussi faible que la Thièle, que si j'avais à y trouver place

pour le Rhône à des profondeurs correspondantes au plafond du lac Léman. Mais passons.

9° Si nous n'adoptons pas l'hypothèse de Rütimeyer, nous devrons faire écouler notre Rhône pliocène dans la direction du sud-ouest et le faire passer par la cluse du Vuache ; aucun autre passage ne lui était ouvert à travers le Jura ou les montagnes au sud de Genève. Pour arriver à Bellegarde, nous ne lui trouvons, sur les cartes géographiques et géologiques, d'autre route que son cours actuel. Je ne vois pas de raisons pour en aller chercher ailleurs.

Il est cependant un fait intéressant à noter, qui n'est pas une objection à l'énoncé que je viens de formuler, mais dont nous aurons à tenir compte. Si nous suivons le cours du Rhône en aval de la ville de Genève, à 7^{km} de distance du lac, sous le village de Vernier, nous trouvons un rapide du fleuve causé par un seuil de mollasse ; les assises miocènes, apparentes des deux côtés du ravin sous les alluvions anciennes, descendent jusque sous les eaux du fleuve, et il est évident qu'une barre de roches en place traverse le lit du Rhône. (1) Ce seuil rocheux mollassique n'est du reste pas le seul de son espèce sur le cours inférieur du fleuve. Sur la belle carte géologique du canton de Genève qu'a dressée A. Favre, on en voit encore des indices évidents au-dessous de Peney, vis-à-vis de la Plaine et au moulin de Challex. Les seuils rocheux que je signale ici sont d'un grand intérêt géologique ; ils sont une preuve indiscutable que si le fleuve a coulé dans ce même lit, — et il semble difficile de le faire couler ailleurs — depuis l'époque miocène il n'a jamais été à un niveau inférieur à ces assises, non encore érodées aujourd'hui. (2) L'altitude du seuil de Vernier, le plus élevé ou le plus rapproché du lac, est 364.85^{m}, soit de 8^{m} au-dessous

(1) L'existence de ce seuil rochéux au moulin de Vernier est affirmée par A. Favre (Rech. géol., I, 90) ; elle m'a été confirmée par M. Th. Turrettini qui, dans ses intelligentes et fructueuses recherches sur le développement des forces motrices du Rhône, a dû étudier spécialement cette localité ; elle résulte enfin du dire unanime des habitants du village voisin de Vernier, ainsi que je m'en suis assuré dans une visite sur les lieux, le 7 mars 1891.

(2) Notons cependant la remarque de M. Léon Du Pasquier qui pourrait peut-être trouver son application ici : « Là où des barres de roche en place traversent les rivières, nous avons affaire à des sections *épigéniques* récentes de la tranchée fluviale, c'est-à-dire à des points auxquels le cours d'eau, en creusant la terrasse, n'a pas retrouvé le lit dans lequel il coulait avant le dépôt de l'alluvion. » Alluvions glaciaires de la Suisse. Archives de Genève, XXVI, 55, 1891.)

de la nappe actuelle du Léman, ou de 5.5^{m} au-dessous du seuil d'alluvion moderne du banc de Travers.

10° Résumons les faits jusqu'à présent constatés : Le dernier seuil rocheux qu'on rencontre dans le lit supérieur du Rhône, dans le haut-Valais, est à la sortie de la gorge de Mörel, en amont du confluent de la Massa, à l'altitude 695^{m}. Depuis ce point jusqu'au fond du lac Léman, la vallée du Rhône valaisan a tous les caractères d'une vallée autrefois plus profonde, aujourd'hui comblée par l'alluvion ; son plafond passe à une profondeur à nous inconnue, sous les alluvions modernes. Nous retrouvons le sol probablement intact de la vallée du Rhône primitif à l'extrémité occidentale de la plaine centrale du Léman, au point où commence la rampe ascendante du plafond du lac, à l'altitude 66^{m}. De là, le fond de cette vallée se relève jusqu'au seuil de Vernier, altitude 364^{m}, recouvert en partie et masqué par les revêtements superficiels des alluvions glaciaires, lacustres et fluviatiles, anciennes et modernes. Ces allures irrégulières, cette contrepente en particulier de la partie occidentale, ne sont pas celles d'une vallée d'érosion. Si nous tenons à notre hypothèse que le bassin du lac a été creusé par l'érosion aqueuse, nous devons donc admettre que ce lit, autrefois en pente continue, a été bouleversé par des soulèvements ou des affaissements locaux et partiels. C'est le point que nous avons à étudier maintenant.

B. L'établissement d'une cuvette sur le cours d'une vallée peut être amené par des faits de variation locale d'altitude, ou bien par le soulèvement de la partie inférieure du cours, ou bien par l'affaissement de la partie supérieure. Je ne vois pas de raison *a priori* qui impose ou fasse écarter l'une ou l'autre de ces possibilités.

La première de ces deux suppositions, l'établissement d'une digue ou barrage à l'extrémité terminale des lacs par des soulèvements locaux, a été proposée par M. Rütimeyer en 1869. Il cherchait une barre arrêtant l'eau dans ses vallées alpines, constituée pour le Léman par le soulèvement du Jura, pour le lac de Constance par le soulèvement des massifs éruptifs qui bordent le Jura, pour le lac de Zurich par les grès des environs de Baden soulevés par le Lägern, pour les lacs alpins dans les seuils de mollasse ou de nagelfluh placés au lac de Thoune entre Uttigen et Heimberg, au lac des Quatre-Cantons dans

la ville de Lucerne et au-dessous de cette ville, au lac de Zoug vers la fabrique de Cham, au lac de Zurich supérieur près de Rapperswyl. C'est donc toujours à un fait de soulèvement postérieur que Rütimeyer attribue l'arrêt de l'eau dans les vallées supérieures, transformées en bassins de lacs ; ce sont tantôt les plis anticlinaux de la mollasse, tantôt le relèvement local de la mollasse par certains contreforts jurassiques, tantôt enfin la masse générale du Jura qui ont formé digue à travers le cours des vallées. C'est dire que, dans cette théorie, toute la partie extra-alpine de la plaine suisse et le Jura auraient subi un mouvement général de relèvement, tandis que les Alpes elles-mêmes seraient restées immobiles.

A première vue, une telle hypothèse est assez plausible. Nous savons que la plaine suisse a été considérablement relevée depuis l'époque miocène ; les golfes où se déposait la mollasse marine, et qui étaient alors au-dessous du niveau de la mer, sont aujourd'hui à des altitudes de 400, de 800, de 1000^{m} et plus. Nous savons aussi que le Jura a été soulevé après les Alpes ; tandis que dans les Alpes nous ne trouvons pas un lambeau de terrains miocènes, nous en trouvons presque dans chaque vallée de toute la partie nord-orientale du Jura, au-delà du val de Travers. Je n'ai donc pas d'objection à attribuer à un soulèvement extra-alpin une partie au moins du mouvement de bascule qui a rendu stagnante l'eau dans les vallées subalpines.

Il y a cependant dans cette hypothèse quelque chose de peu satisfaisant qui m'arrête. Si l'on donne une telle importance aux soulèvements locaux pour former les barres qui soutiennent les lacs, pourquoi des soulèvements analogues ont-ils produit des effets si différents d'une vallée à l'autre ? Pourquoi le relèvement de la mollasse au bord même des Alpes, qui aurait constitué les barres des lacs de Thoune, des Quatre-Cantons, de Zoug et de Zurich supérieur, n'a-t-il eu aucune action sur la vallée du Rhône ? Pourquoi ne trouvons-nous pas la limite du Léman à l'axe anticlinal de Lausanne ? Pourquoi ce lac s'est-il étendu jusqu'à Genève en traversant presque toute la plaine miocène ?

Puis je me heurte, en ce qui regarde le Léman, à une grosse difficulté. C'est la question de la profondeur du lac et, par conséquent, de la vallée d'érosion dans laquelle il s'est établi. Le plafond du lac est

actuellement à la cote absolue(¹) de 62ᵐ ; mais cette altitude ne nous donne pas celle de la vallée primitive, qui était bien inférieure. Chaque année le Rhône du Valais et les affluents du lac y déchargent leur alluvion et nous verrons que l'épaisseur de la couche annuelle ainsi déposée est supérieure à deux centimètres ; chaque siècle, le plafond du lac s'est relevé de deux mètres ; en trois mille ans, il s'est relevé d'au moins soixante mètres. Il y a trois mille ans, c'est-à-dire à une époque où notre lac portait les constructions lacustres de l'âge de la pierre, où le Léman avait les mêmes niveaux et certainement le même relief géologique qu'actuellement, à une époque par conséquent postérieure à l'établissement de la vallée d'érosion primitive, le plafond du lac était à peu près au niveau de la mer.

Mais, dans l'hypothèse du creusement de la vallée du Léman par l'érosion aqueuse, le lit du Rhône devait avoir une pente sensible jusqu'à son embouchure dans la mer. Nous savons qu'à l'époque pliocène la mer ne remontait pas au-delà de Lyon; que l'embouchure du Rhône était à une distance de 150ᵏᵐ au moins de ce qui est aujourd'hui la plaine des grandes profondeurs du Léman. Entre ces deux points, le fond de la vallée du Rhône dans le profil Ouchy-Evian et l'embouchure à la mer, le fleuve s'écoulait avec une pente continue d'au moins 1 pour mille, probablement 2 pour mille ; 2 ⁰⁰/₀₀ sur 150ᵏᵐ représentent 300ᵐ. Il est donc nécessaire qu'à l'époque du creusement de la vallée du Léman, son plafond fût à une altitude d'environ 300ᵐ. Or le plafond du Léman, qui est actuellement à la cote 62ᵐ, était, avant son comblement par les alluvions modernes, au niveau de la mer ou au-dessous. Donc il y a eu nécessairement, depuis le creusement de la vallée du Léman par érosion du Rhône, un affaissement local de 300ᵐ ou plus.

Donc il ne suffit pas de trouver, avec Rütimeyer, dans un soulèvement du côté de Genève, la formation de la barre qui a soutenu le lac, il faut encore chercher dans un affaissement ultérieur de la région alpine du lac l'explication de l'altitude actuelle du plafond du Léman.

La même objection se présente avec plus de force encore pour les

(¹) J'emploierai ici la cote d'altitude absolue 62ᵐ, en faisant intervenir la correction de l'altitude de la Pierre du Niton ; voyez page 22.

lacs insubriens, le Lario avec la cote de son plafond à 201^{m} sous la mer, le Verbano avec — 178^{m}, le Ceresio avec — 8^{m} ; le plafond de ces lacs est aujourd'hui au-dessous du niveau marin ; il l'était plus encore avant que les alluvions modernes les eussent comblés en partie. Si le creusement des lacs insubriens est dû à l'érosion aqueuse, il faut que la région qu'ils occupent ait été notablement plus élevée au-dessus de l'océan à l'époque où le fond de ces lacs était le plafond d'une vallée parcourue par un fleuve qui s'écoulait à la mer.

La même objection serait encore applicable, mais avec moins d'évidence, aux lacs les plus profonds du centre de la Suisse. Le plafond du lac de Brienz est actuellement à la cote 305^{m}, celui du lac des Quatre-Cantons à la cote 223^{m}, celui du lac de Wallenstadt à 274^{m}. Si l'on soustrait de ces altitudes l'épaisseur des alluvions modernes, on trouvera la cote actuelle du plafond primitif de la vallée. Mais aura-t-on alors la pente nécessaire pour l'écoulement du fleuve qui menait ses eaux à la mer ? Il paraît probable qu'il faudrait là aussi invoquer des affaissements ultérieurs de la région.

Nous sommes donc conduits, si nous nous en tenons aux hypothèses du creusement des vallées des lacs par érosion fluviale et de la formation de leurs digues par soulèvement local, à compléter ces théories en supposant des affaissements ultérieurs locaux ou généraux de la partie alpine de ces vallées. Cette complication est nécessaire pour expliquer la cote actuelle d'altitude du plafond de tous nos grands lacs. Et, comme les mêmes faits se reproduisent sur les deux versants des Alpes, nous aurions l'ensemble d'événements que voici : Pendant le creusement des vallées d'érosion des Alpes, soulèvement général du pays au-dessus du niveau actuel, puis soulèvements locaux dans le pays subalpin au nord et au sud des Alpes pour former les digues des lacs, puis affaissements locaux ou généraux, tout au moins de la région du Léman et de l'Insubrie, pour satisfaire à la cote d'altitude du plafond des lacs.

Il me paraît beaucoup plus simple de nous adresser à la deuxième supposition que j'énonçais plus haut pour expliquer la formation des bassins des lacs, et c'est celle que je veux proposer actuellement. Les cuvettes des lacs ont été produites par affaissement de la partie alpine de la vallée d'érosion. Comme des lacs analogues existent sur tout le bord des Alpes centrales, aussi bien sur le versant nord que sur le

versant sud, nous n'avons qu'à admettre un affaissement général de toute la chaîne des Alpes centrales.

Développée dans ses conséquences, notre hypothèse implique :

1° Une phase de soulèvement de la région alpine et subalpine qui a porté la chaîne des Alpes à une altitude de quelques centaines de mètres supérieure à l'altitude actuelle. Pendant cette phase, les vallées des Alpes ont été creusées par érosion jusqu'à une profondeur absolue satisfaisant aux conditions de pente continue jusqu'à la mer, jusqu'à une profondeur relative correspondant au fond de la cuvette primitive de nos grands lacs.

2° Une phase d'affaissement général du massif alpin, qui a amené la région aux altitudes actuelles. L'affaissement étant limité aux Alpes, il s'est produit une contrepente sur le cours des fleuves, les eaux sont devenues stagnantes et ont reflué dans les vallées alpines, en y formant des lacs longs et étroits.

3° Une phase qui dure jusqu'à nos jours de comblement progressif des lacs.

Reprenons en les justifiant et en les élucidant ces trois phases de la genèse des lacs.

Phase de surexhaussement. La géologie nous enseigne que le massif des Alpes a été soulevé après l'époque miocène. Jusqu'à présent l'on a admis que ces montagnes ont été portées à ce moment-là jusqu'à l'altitude que nous leur connaissons actuellement ; notre hypothèse augmente notablement ce mouvement d'exhaussement et les fait soulever de plusieurs centaines de mètres plus haut.

En énonçant cette supposition je ne fais pas double emploi avec la notion que divers auteurs, Alph. Favre entr'autres, (1) ont développée, à savoir que les Alpes étaient autrefois plus élevées que de nos jours ; que par le délitement, la désagrégation résultant du jeu des intempéries, par les éboulements et les effondrements, par les érosions aérienne, aqueuse et glacée, leurs cimes perdent chaque année en altitude. Ce fait de la dénudation des montagnes est évident, il n'est pas hypothétique. Ma supposition va plus loin ; elle admet que non-seulement les Alpes étaient plus hautes de toute la masse que l'érosion superficielle

(1) Recherches, II, 361, III, 150, 238.

a enlevée dans le cours des siècles, mais encore que les roches en place ont été portées primitivement à une altitude plus élevée. Tel gisement qui actuellement est à la cote 1000^{m} était alors à 1500, à 2000^{m} au-dessus de la mer.

Ces Alpes ainsi surexhaussées étaient, comme les Alpes actuelles, ravinées par les eaux courantes : torrents et fleuves y creusaient des vallées comme toujours et partout. Mais la pente étant plus forte, l'érosion pouvait descendre plus bas, et les vallées être creusées plus profondes.

Supposons que par un soulèvement actuel le Valais se relevât aujourd'hui de 500^{m}, le Rhône gardant son embouchure intacte dans le lac Léman non modifié. Qu'arriverait-il ? La vallée du Rhône ne tarderait pas à s'approfondir et, dans quelques siècles, le fleuve s'y serait creusé un ravin de quelques cents mètres en contre-bas de la plaine où ses eaux circulent aujourd'hui. Le plafond de cette vallée de nouvelle formation finirait par descendre à l'altitude de la vallée actuelle du Rhône, car l'érosion ne s'arrêterait que lorsque la pente aurait atteint cette valeur de 1 à 2 $^{00}/_{00}$ qui semble être la pente limite de l'écoulement du fleuve. Mais tandis que son altitude absolue ne serait pas différente des conditions actuelles, son altitude relative serait tout autre ; le plafond de la nouvelle plaine du Rhône serait de 500^{m} en contre-bas de la plaine actuelle ; les restes de celle-ci apparaîtraient comme des terrasses à 500^{m} de hauteur sur les talus de la nouvelle vallée d'érosion.

De même un surexhaussement général de la région des Alpes aux époques post-miocènes a dû amener un creusement de profondes vallées descendant à un niveau relatif inférieur à celui des vallées actuelles. Le plafond de ces vallées hypothétiques doit être noyé sous l'alluvion des vallées modernes.

Vallées d'érosion, ces vallées avaient une pente continue jusqu'à la mer, sans contrepente, sans bassins de lacs. Du fond de ces vallées nous ne retrouvons actuellement que quelques points ; tout le reste est masqué par les couches impénétrables des alluvions ultérieures. Les points qui peuvent nous servir de jalons sont les seuils rocheux et le fond des lacs ; je prendrai mes exemples dans la vallée du Rhône.

Les seuils rocheux apparaissant aujourd'hui dans le lit du fleuve sont des repères précieux. La roche en place nous indique qu'en ce point l'érosion n'est jamais descendue plus bas. Ce sont des valeurs maximales, qui n'ont jamais été dépassées par le creusement de la val-

lée. Il est évident qu'une certaine épaisseur de ces bancs de roche, sur lesquels le fleuve cascade, a été enlevée par l'érosion aqueuse depuis les époques où la vallée primitive a été excavée ; mais il est certain que jamais le cours du fleuve n'a été plus bas (altitude relative) que ces assises rocheuses. De seuil de ce genre, le premier que nous connaissons sur le cours du Rhône au-dessous du lac Léman est celui du moulin de Vernier, à l'altitude actuelle de 364^{m}, au-dessus du Léman celui de la Massa.

Le fond des lacs est, dans notre hypothèse, un second témoin de l'altitude relative de l'ancienne vallée d'érosion. Le plafond actuel n'est évidemment pas le plafond primitif ; celui-ci a été recouvert par l'alluvion moderne. Mais l'alluvion lacustre n'a pas l'activité de dépôt de l'alluvion fluviatile ; elle est plus disséminée et plus dispersée. Nous savons que le plafond primitif de la vallée d'érosion était à un niveau relatif un peu inférieur au plafond actuel du lac ; nous avons la certitude qu'il ne lui était pas supérieur. Le plafond du Léman sur le profil Morges-Amphion est à la cote d'altitude de 66^{m}. (1)

En nous maintenant dans l'hypothèse que la vallée d'érosion du Léman aurait été creusée par le fait du surexhaussement des Alpes, utilisons les valeurs connues de ces témoins pour apprécier la hauteur probable du surexhaussement au-dessus des altitudes actuelles.

Admettons que l'alluvion lacustre moderne ait relevé de 10^{m} le plafond du lac ; le plafond actuel étant à la cote de 66^{m}, le plafond primitif était sur la couche qui est aujourd'hui à 56^{m} au-dessus de la mer.

Admettons que l'érosion moderne ait abaissé de 10^{m} le seuil de Vernier ; il est actuellement à la cote 364^{m}, il était à l'époque post-miocène à laquelle nous nous reportons, à la cote 374^{m}.

La distance horizontale entre les deux points considérés, profil Morges-Amphion, et seuil de Vernier est de 50^{km}.

A en juger par la pente actuelle du Rhône en Valais et entre Genève et Bellegarde, il devait y avoir dans notre vallée primitive une pente de 2 $^{00}/_{00}$ environ. 2 $^{00}/_{00}$ pour 50^{km} donne 100^{m}. Par conséquent le plafond de la vallée dans le profil Morges-Amphion devait être de 100^{m} plus élevé que le seuil de Vernier.

Si nous supposons que l'altitude absolue du seuil de Vernier n'ait

(1) Je ne fais pas intervenir ici la correction d'altitude de la Pierre du Niton, parce que j'ai à comparer cette cote avec d'autres valeurs mesurées d'après la carte fédérale.

pas changé, nous aurions pour altitude absolue du plafond de la vallée primitive dans le profil Morges-Amphion :

$$364 + 10 + 100 = 474^m.$$

Ce plafond est actuellement à la cote 56^m. Il faut donc que depuis l'époque du creusement de la vallée d'érosion il se soit abaissé de

$$474 - 56 = 418^m.$$

Mais il est évident, comme nous l'avons vu plus haut, que le plafond de la rampe ascendante du Léman se continue sous l'alluvion de la plaine centrale du lac en une pente prolongée, que sous le profil Ouchy-Evian le plafond des murailles du lac est plus bas que sous le profil Morges-Amphion ; que sous le profil Lutry-Tour ronde il est encore plus bas, et ainsi de suite. Où s'arrête cette descente du plafond des murailles, jusqu'où devons-nous le poursuivre ? Nous ne le savons, mais je n'hésite pas à dire que, par ce calcul, nous devons évaluer à 500^m au moins la valeur de l'enfoncement que, dans notre hypothèse, la région moyenne du lac a dû subir pour amener la contrepente constatée aujourd'hui entre la plaine centrale et le seuil de Vernier. Ce serait la valeur minimale du surexhaussement des Alpes à l'époque post-miocène.

Pour les lacs de l'Insubrie, je suis trop mal orienté sur les faits géologiques de la région pour que j'ose hasarder un calcul analogue. Mais le plafond actuel du lac de Côme, le plus profond, étant à 201^m au-dessous du niveau de la mer, un surexhaussement de 500^m semble un minimum à peine suffisant pour expliquer l'érosion d'une vallée.

Je serais porté à dire que les faits connus réclament un surexhaussement post-miocène des Alpes de 500 à 1000^m pour expliquer le creusement des lacs par voie d'érosion. Un tel surexhaussement de la chaîne des Alpes est-il dans les choses admissibles ? Il le semble. Le Mont-Blanc s'élève actuellement à 4810^m, il aurait été porté à 5300 ou 5800^m. Ç'aurait encore été une cime inférieure aux grandes sommités de l'Himalaya, 8837^m, du Kouen-lun, 7300^m, des Andes de Bolivie, 7494^m, du Kilimandscharo, 6000^m, égale à l'Elbrouz du Caucase, 5646^m.

Pouvons-nous espérer des preuves positives du surexhaussement hypothétique des Alpes ? C'est peu probable. Je ne sais trop dans quel ordre de phénomènes inscrits dans les documents géologiques il faudrait aller chercher une telle démonstration. Peut-être l'étude ultérieure et la discussion de la théorie amèneront-elles à des arguments décisifs, ou en sa faveur ou contre elle ; jusqu'à présent je n'ai sû

trouver que deux ou trois faits à étudier ; les conclusions que l'on peut en tirer sont encore peu précises.

Le premier traite de l'altitude relative de la région alpine et de la région jurassique en considérant la pente superficielle des grands glaciers géologiques. La position des dernières moraines latérales et frontales nous donne la limite exacte du glacier. Cette limite a été relevée avec soin pour la partie suisse par Alph. Favre dans ses belles recherches sur les anciens glaciers, (1) et pour la partie française du glacier du Rhône par MM. Falsan et Chantre. (2) Voici, d'après ces auteurs, ce qui regarde le glacier du Rhône :

Si nous nous en tenons aux cotes actuelles des points considérés, et si nous n'invoquons aucun mouvement ultérieur de dénivellation du sol, nous trouvons que, dans toute la vallée du Valais, l'ancien glacier du Rhône avait une pente régulière, peu forte, il est vrai, mais qui ne nous surprend pas, ne nous étonne pas. Au Schneestock, le glacier s'élevait à l'altitude de 3550^m ; à l'Illhorn vis-à-vis de Louèche, ses dernières moraines sont à la cote 2100^m, à Morcles, vis-à-vis de St-Maurice à 1650^m. D'après les distances qui séparent ces trois points, la pente superficielle était, dans le haut-Valais, de 14 $^{00}/_{00}$, dans le bas-Valais de 7 $^{00}/_{00}$. C'est une pente faible, mais c'est encore une pente admissible ; étant donnée l'énorme épaisseur du glacier, on peut comprendre comment le fleuve de glace pouvait trouver à s'écouler. De même au-delà du Jura : à Bellegarde, les dernières moraines latérales sont à 1200^m, à Lyon, les dernières moraines frontales à 294^m. Pour une distance de 136^{km}, cela représente une pente de 14 $^{00}/_{00}$.

Mais entre ces deux régions, dans la plaine suisse, la pente superficielle se réduit à très peu de chose. A Morcles, nous avons dit que les dernières moraines sont à l'altitude de 1650^m, au Chasseron on les trouve à 1410^m, au Chasseral à 1306, sur le Salève à 1330, au Molard de Don, près de Belley, 1100^m. Entre ces points, Morcles et le Chasseron ou le Chasseral, Morcles et le Salève, Salève et le Molard de Don, autrement dit entre les Alpes et le Jura, la pente descend à 2 $^1/_2$ ou 3 $^{00}/_{00}$. — Des faits analogues sont signalés par Favre dans l'ancien

(1) Voir sa carte du phénomène erratique et des anciens glaciers du versant nord des Alpes : au 1 : 250 000e, 1884. Et encore *A. Favre*. Notice sur... les anciens glaciers du revers septentrional des Alpes suisses. Arch. Genève, LVII, 181 sq. 1876.

(2) *Falsan et Chantre*. Monographie des anciens glaciers de la partie moyenne du bassin du Rhône, Lyon 1879. — *A. Falsan*. La période glaciaire, Paris 1889.

glacier du Rhin. Tandis que dans les Alpes d'un côté et dans sa partie transjurane d'autre part, le glacier du Rhône aurait eu une pente relativement assez forte, sur la plaine suisse, entre les Alpes et le Jura, sa pente se serait considérablement réduite ; il aurait formé une mer stagnante de glaces où la pente serait descendue à 2 ou 3 $^{00}/_{00}$. Le fait est-il possible ?

Dans les Alpes actuelles, les glaciers modernes qui ont la plus faible pente sont ceux d'Otemma et du Gorner. Le glacier d'Otemma (vallée de Bagnes), dans sa partie moyenne, à l'altitude de 2900^{m} à peu près, mesure encore 3 $^{0}/_{0}$ de pente ; le Gorner, au pied du Gornergrat, sur une longueur de plus de 3^{km}, a de même 3 $^{0}/_{0}$; le glacier d'Aletsch, devant la Concordia-Hütte, dans sa branche qui vient du grand névé d'Aletsch, à l'altitude de 2880^{m}, a une pente de 4 $^{0}/_{0}$; la pente générale de ce glacier, le moins déclive peut-être de tous les glaciers des Alpes, est de 6 $^{0}/_{0}$. C'est dans sa branche du Finsteraar, que le grand glacier de l'Aar est le moins incliné ; sur une longueur de 3.5^{km} il a encore une pente de 5 $^{0}/_{0}$. En résumé, dans les glaciers actuels des Alpes nous ne trouvons pas de pente superficielle inférieure au 3 $^{0}/_{0}$.

Si nous nous transportons au Groënland nous arrivons, il est vrai, à des inclinaisons plus faibles de la nappe de glace. Jansen, en 1878, a mesuré au pied de ses nunataks situés à 40^{km} dans l'intérieur de l'inlandsis, un peu au nord de Frederikshaab, une altitude de 1250^{m}, ce qui représente une pente générale de 3 $^{0}/_{0}$. [1] Nordenskjöld, dans sa grande expédition de 1883, est arrivé à 120^{km} sur l'inlandsis, dans la latitude de Christianshaab ; il a atteint la cote d'altitude de 1510^{m}, ce qui fait une pente de 1.2 $^{0}/_{0}$. [2] Nansen, enfin, dans sa traversée épique du Groënland, en 1888, est arrivé à un point culminant de 2718^{m} d'altitude. [3] Il était alors à 180^{km} de la côte orientale, ce qui donne une pente moyenne de 1.5 $^{0}/_{0}$, et à 270^{km} de la côte occidentale, pente moyenne de 1 $^{0}/_{0}$.

Il est vrai que, dans ces pentes moyennes, il entre pour une large part la déclivité très forte de l'extrémité terminale des glaciers ; que dans la partie médiane de l'inlandsis la pente est presque nulle, ou

(1) *A.-E. Nordenskjöld.* La deuxième expédition suédoise, trad. Ch. Rabot. Paris 1888, p. 202.

(2) *Ibid*, p. 156.

(3) Communication de *Nansen* à la Société de géographie de Berlin, 8 novembre 1890.

nulle ; que si nous suivons les Lapons de Nordenskjöld, Lars et Anders, dans leur course d'exploration en *ski* qui les a fait avancer de 230km plus loin que leur chef, nous ne les voyons arriver qu'à une altitude de 1947m, d'après leurs lectures du baromètre ; entre la dernière station de Nordenskjöld et le point extrême atteint par les Lapons il n'y aurait qu'une pente de 2 $^{00}/_{00}$; que Nansen compare la surface de l'inlandsis à une calotte de glace de 10 400km de rayon, ce qui donnerait pour sa partie centrale une nappe absolument horizontale.

Mais les Lapons de Nordenskjöld, aussi bien que Nansen, étaient parvenus sur le plateau central, sur la ligne de faîte, sur la plaine des névés qui, en s'étalant, donnent naissance à l'inlandsis. Il y a là des conditions toutes différentes de celles d'un glacier d'écoulement, et nous n'avons aucunement le droit de comparer ces régions à pente nulle avec la mer de glace, glacier et non névé, fleuve de glace et non faîte d'un plateau de neige, qui devait dans les âges glaciaires s'étendre entre les Alpes et le Jura. Laissons donc de côté ces régions à pente nulle de la partie centrale du Groënland, et constatons que dans les régions côtières abordées par Jansen, Nordenskjöld et Nansen, la pente superficielle s'élève de 1.2 à 3 $^{0}/_{0}$, que dans les glaciers actuels des Alpes les pentes les plus faibles sont de 3 à 6 $^{0}/_{0}$.

Si donc nous considérons les cotes actuelles d'altitude des anciennes moraines de Morcles, du Chasseron, etc., nous avons, pour les glaciers géologiques de la plaine entre les Alpes et le Jura, une pente au moins trois fois trop faible pour correspondre avec les faits aujourd'hui connus, une pente si faible (2 à 3 $^{00}/_{00}$) que nous ne pouvons comprendre l'écoulement de la glace. N'oublions pas, en effet, qu'une pente de 3 $^{00}/_{00}$ est de très peu supérieure à la pente de la plaine presque horizontale qui s'étend de Martigny à Sierre, pente de 2 $^{00}/_{00}$. Mais au contraire, si nous admettons qu'à l'époque glaciaire les Alpes étaient surexhaussées de quelque 500 à 1000m, tout s'arrange, tout s'explique. Le glacier de la plaine suisse aurait eu alors une pente raisonnable, de 1 $^{0}/_{0}$ avec un surexhaussement de 500m, de 1.5 $^{0}/_{0}$ avec un surexhaussement de 1000m. Il y aurait eu là une pente suffisante, et nous ne serions plus obligé à des subtilités d'interprétation pour comprendre l'écoulement de ce glacier. Il me paraît donc que l'on peut tirer des faits observés qui se rapportent à l'époque glaciaire un argument fort probant en faveur de notre hypothèse du surexhaussement post-miocène des Alpes.

Mon second argument n'est pas par lui-même très directement démonstratif. Je serai entraîné bientôt à le développer et à lui donner une beaucoup plus grande extension ; pour le moment je le présente dans sa forme la plus simple et je dis : Un surexhaussement du pays implique une modification du climat local. La température, la chaleur atmosphérique entr'autres, doit être abaissée d'un degré par 150 ou 200^{m} de surélévation. Or, le seul renseignement que la géologie nous apprenne sur l'histoire de la région des Alpes, dans la période qui s'étend entre le miocène et les temps modernes, c'est qu'il y a eu alors l'énorme extension des glaciers de l'époque glaciaire. Un tel agrandissement des glaciers peut s'expliquer de diverses manières, mais il n'est pas incompatible avec l'hypothèse d'un surexhaussement des Alpes. Si nous avions à citer l'apparition de palmiers et de fougères arborescentes dans notre pays, nous en tirerions une objection irréfutable ; nous y constatons des glaciers plus étendus que ceux de nos jours, ce qui implique un climat plus froid. Donc le fait d'histoire géologique qui s'appelle l'époque glaciaire peut être invoqué comme un argument en faveur de notre théorie de la surélévation du massif des Alpes, dans la période où s'est fait le creusement définitif des grandes vallées de nos lacs.

Il est encore un autre ordre d'arguments que je puis utiliser indirectement. Je les réunirai en un groupe pour abréger. Il y a dans la structure de nos grandes vallées des faits qui peuvent s'interpréter de diverses manières, mais qui s'expliquent mieux dans l'hypothèse que nous étudions que dans toute autre. Ces faits sont en particulier :

a La largeur des vallées principales des Alpes. La plaine du Rhône de Brigue au Léman, la plaine de l'Aar de Meiringen au lac de Brienz, la plaine de la Reuss de Am Stäg au lac des Quatre-Cantons, la plaine de la Linth, celle du Rhin, sont de larges vallées à fond plat, recouvert d'alluvions. Leur structure est très simple si l'on admet qu'elles ont été autrefois de profondes vallées d'érosion, comblées ultérieurement par l'alluvion du fleuve principal et de ses affluents. Il est vrai que l'on pourrait supposer aussi qu'elles n'ont jamais été beaucoup plus profondes qu'elles ne le sont actuellement, qu'elles ont été élargies par les divagations latérales du fleuve et que la couche d'alluvion qui recouvre leur plafond, très peu épaisse, n'est que le résultat de la diminution de pente du fleuve par suite du prolongement du lit fluviatile, à mesure qu'il a rempli partiellement le lac dans lequel il se déverse.

Dans l'ignorance où nous sommes du sous-sol de ces vallées, cette supposition peut être émise ; mais elle nous semble moins plausible que la première, étant connue la solidité générale des assises rocheuses dans lesquelles ces vallées sont creusées.

b L'absence de seuil rocheux apparent dans le plafond des grandes vallées implique presque nécessairement le creusement de ces ravins à une profondeur beaucoup plus grande que celle que nous voyons aujourd'hui.

c La présence d'un lac dans la plupart de ces vallées, de deux ou plusieurs lacs dans quelques-unes d'entr'elles, ne s'explique facilement que si ces bassins sont des restes non comblés de l'ancien état de choses de la vallée.

Ces trois faits semblent montrer que les grandes vallées ont été creusées par l'érosion aqueuse. Il est vrai qu'ils s'expliquent aussi bien par la théorie qui admet un soulèvement ultérieur de la partie inférieure des vallées, que par l'hypothèse que nous défendons d'un surexhaussement de leur cours supérieur à l'époque de leur approfondissement. Mais nous pouvons constater qu'ils ne sont pas en contradiction avec notre hypothèse, et par conséquent nous avons le droit de les invoquer comme arguments en faveur de nos idées. Ce ne sont pas des arguments décisifs, mais des arguments de probabilité.

Je ferai encore appel à un fait de géologie locale, facile à constater sur la rive vaudoise du Léman ; il semble indiquer que ce qui est aujourd'hui le bassin du lac a été autrefois une vallée ouverte à l'air libre à une profondeur plus grande que n'est aujourd'hui la nappe des eaux. Voici le fait :

Quelques-unes des petites vallées, affluents directs du lac, creusées dans les terrains mollassiques, montrent sur leur plafond, jusque très près du lac, des seuils de roche en place, calcaire aquitanien, mollasse, marne, sur lesquels l'érosion continue à travailler. La Morge, la Promenthouse, la Paudèze, le Flon, le nant du Vangeron sont dans ce cas. Ce sont des vallées de creusement récent et actuel qui continuent à s'approfondir jusqu'à ce que leur plafond soit arrivé à la limite de pente où l'érosion cesse, limite en rapport avec la puissance de leur transport en temps de crue. Mais d'autres vallées ont une structure toute différente. Leur plafond est dans leur cours inférieur tout entier dans l'alluvion ; nulle part on n'y voit de seuil rocheux ; leur pente, relativement plus douce, ne fait nulle part cascade sur des assises de roche

en place. Je citerai la Venoge, le Boiron près Morges, l'Aubonne, la Versoie. (1) Leur lit est en entier creusé dans un terrain de transport composé de blocs ou cailloux erratiques, d'argiles glaciaires, de galets et de sables remaniés. Nous ne savons pas à quelle profondeur descend ce terrain de transport ; peut-être n'est-ce qu'à quelques mètres, peut-être est-ce beaucoup plus bas. Toujours est-il qu'une telle structure indique très sûrement que la vallée a été creusée autrefois plus qu'elle ne l'est actuellement, et qu'elle a été comblée depuis lors par le terrain de transport. Ce terrain, étant de nature discrète, a été attaqué par l'érosion, et la vallée s'est approfondie jusqu'à la limite de pente où l'érosion cesse. La pente limite n'atteignant pas le plafond primitif creusé dans la roche en place, nous pouvons affirmer que la pente actuelle est moins inclinée que ne l'était la pente originelle de la vallée.

Quelle est la cause qui a fait diminuer la pente ? Il n'y a guère qu'une réponse possible, c'est que la rivière débouchait autrefois, au point qui est aujourd'hui son entrée dans le lac, à un niveau inférieur à la nappe actuelle des eaux. Or rien dans l'histoire du Léman actuel ne nous parle d'un niveau inférieur du lac. Nous n'avons pas vu sur la carte hydrographique de terrasses submergées qui puissent nous y faire penser ; au contraire, les terrasses fluvio-lacustres émergées nous apprennent que, dans les temps post-glaciaires, au début de l'époque actuelle, le Léman a eu des niveaux plus élevés que ceux de nos jours. Donc nous devons rapporter le creusement primitif de ces petites vallées à une époque où il n'y avait pas encore de lac, et, dans notre hypothèse, à l'époque où le fond de la cuvette du Léman était parcouru par un fleuve, le Rhône. Ces vallées, quelque insignifiantes qu'elles paraissent, seraient donc d'un âge assez ancien.

Si l'on m'objecte que la carte hydrographique ne montre pas devant ces vallées un relief indiquant l'amorce d'anciens ravins, je répondrai que l'alluvion grossière moderne a depuis longtemps comblé ces creux,

(1) Pour la Venoge je n'ai point su trouver de seuil mollassique en aval de Cossonay, soit sur une longueur de plus de 11^{km} ; pour l'Aubonne le premier seuil mollassique est à 500^{m} en amont de la fabrique de poudre de Lavaux, à plus de 4^{km} du lac ; le Boiron ne montre pas de seuil entre le lac et Lussy, peut-être même plus haut ; la Versoie, quoique présentant des lambeaux miocènes, à la prise du bief de la papeterie de Versoix sur la berge droite et un peu plus haut sur la berge gauche, n'offre de véritable seuil mollassique apparent qu'en amont de la Bâtie à 4^{km} du lac.

aussi bien dans le lac qu'à l'air libre; qu'ils sont masqués par le cône d'alluvion des rivières. Puis je rappellerai que dans le golfe de Morges, entre la Morge et la Venoge, nous avons trouvé un ravin submergé qui semble se rapporter à un fait de ce genre. Il est évident que la preuve serait bien plus décisive si nous pouvions démontrer que la couche du terrain de transport au fond de ces vallées a une grande épaisseur, et prouver ainsi que ces vallées étaient primitivement beaucoup plus profondes. Mais en l'absence de cette démonstration, il me paraît cependant que, de l'absence de seuil de roche en place dans nombre de ravins des affluents directs du lac, j'ai le droit de tirer un argument assez plausible en faveur de l'hypothèse que je soutiens.

En somme nous avons quelques arguments, en petit nombre, et de valeur très inégale, qui semblent parler en faveur de l'hypothèse d'un surexhaussement des Alpes ; nous n'en avons pas su trouver de contradictoires à l'hypothèse. Nous pouvons donc, jusqu'à réfutation, l'admettre comme possible. S'il y a eu surexhaussement des Alpes, il peut y avoir eu creusement par érosion de profondes vallées descendant jusqu'au niveau relatif indiqué par le plafond actuel des grands lacs subalpins. Ce n'est pas improbable ; c'est même plausible. Un tel ordre de vraisemblance est tout ce que nous pouvons demander à une théorie qui traite de faits aussi éloignés, dans des temps aussi incertains, pour des événements sur lesquels nous possédons aussi peu de renseignements.

Je dis que, pendant la phase de surexhaussement, les vallées ont été creusées et approfondies par érosion aqueuse ; j'entends sous ce terme aussi bien l'érosion de l'eau courante à l'air libre, que l'érosion de l'eau courante sous le glacier, que l'érosion glaciaire. Ainsi que je l'ai expliqué plus haut, pour que le glacier érode efficacement, il est nécessaire que le vallon soit parcouru par un torrent glaciaire, qui enlève à mesure les poussières résultant de la trituration des roches ; c'est bien le glacier qui agit dans ce cas le plus puissamment pour réduire en poudre les pierres de la moraine profonde et le sol sur lequel il glisse, mais c'est l'eau courante qui emmène les sables et limons produits par ces frottements. Je ne serai donc aucunement empêché d'admettre que le creusement des vallées, en tout ou en partie, se soit fait pendant l'époque glaciaire, sous la pression très efficace de l'énorme glacier.

Phase d'affaissement. Après la période de surexhaussement

pendant laquelle les vallées auraient été excavées jusqu'à de grandes profondeurs, les Alpes ont dû s'abaisser dans leur ensemble, et subissant un affaissement de quelque cinq cents ou mille mètres, elles sont descendues aux altitudes que nous connaissons.

Cet affaissement a-t-il été subit ou prolongé, rapide ou lent ? est-ce par années, par siècles, ou par milliers d'années qu'il faut en évaluer la durée ? Nous l'ignorons.

Avons-nous des preuves de cet affaissement ? Nous n'en pouvons avoir d'autres que celles — et elles ne sont malheureusement pas bien décisives — que nous avons su ou que nous saurons trouver en faveur de l'hypothèse du surexhaussement antérieur. S'il y a eu surexhaussement des Alpes, pour qu'elles soient revenues à l'état actuel, il faut qu'elles se soient affaissées ultérieurement. Inutile de développer ce truisme.

Je citerai cependant un fait assez étrange, qui pourrait faire croire que le mouvement d'affaissement du massif alpin se continuerait encore de nos jours. Le voici en résumé. Dans les grands débats limnologiques qu'a provoqués le procès du Léman, porté de 1877 à 1884 devant le Tribunal fédéral par les Etats de Vaud, du Valais et de Genève, il est un seul point dans lequel nous, le parti vaudois, nous ayons été battus. C'était un détail dans les questions limnimétriques.

S'il est un point de la limnimétrie ancienne du Léman qui ait puissamment éveillé l'attention des riverains, et sur lequel des documents précis nous aient été conservés, c'est la hauteur extraordinaire des eaux en 1816 et 1817. Dans ces années désastreuses, l'inondation a dépassé des limites qui n'avaient jusqu'alors pas été atteintes, et qui ne l'ont pas été depuis. Aussi nombre de marques et repères ont été inscrits à cette époque sur les rives du lac, indiquant la hauteur maximale des eaux. Nous les avons trouvés tracés sur les murs du port de Morges, repères du mur Pache-Martin ; (1) nous en avons la hauteur exacte mesurée par un procédé, assez compliqué mais très précis, par J. Favre de Rolle ; (2) nous les trouvons figurés sur la curieuse planche Develey. (3) Nous en savons les cotes en valeur de l'échelle Mestrezat au creux de Plan qui, après diverses péripéties, a été nivelée en 1880

(1) *F.-A. Forel.* Limnimétrie du Léman V, § XXVIII. Bull. S. V. S. N, XVII, 311.

(2) *Ibid.*, p. 312.

(3) Voir le fac-simile de cette planche dans les documents publiés par l'Etat de Vaud, le 3 mars 1882.

par M. Gonin et dont le zéro a été rapporté en hauteur absolue; (1) en valeur aussi du limnimètre Nicod-Delom de Vevey dont nous avons de notre mieux évalué la hauteur. (2) En rapportant tous ces renseignements au plan d'altitude donné par le nivellement de précision, nous sommes arrivés à des résultats assez concordants pour que nous pussions croire connaître à quelques centimètres près, à un ou deux décimètres tout au moins, la hauteur de ces eaux d'inondation ; nous avons affirmé qu'elles étaient restées inférieures au repère de la Pierre du Niton. Voici les cotes de hauteur des eaux obtenues par ces divers procédés, exprimées en valeur du limnimètre normal du lac dont le zéro est à 3m au-dessous du repère de la Pierre du Niton (Z L = R P N — 3m). Je rappelle, comme je l'ai indiqué, page 23, et comme je l'exposerai plus loin, que nous désignons par les lettres Z L (Zéro du Léman) l'étiage de la limnimétrie du Léman, conformément aux propositions faites en 1854 par le colonel F. Burnier.

Hautes eaux de	1816	1817
Marques du Port de Morges, Pache-Martin	Z L + 2.882m	Z L + 2.939m
Notes de J. Favre de Rolle		2.897m
Planche Develey	2.788m	2.861m
Observations Mestrezat, nivellement Gonin	2.807m	2.880m
Observations Nicod-Delom, repérage F.-A. F.	2.753m	2.826m
Moyenne	Z L + 2.807m	Z L + 2.881m

La moyenne de ces chiffres, rapportée au repère de la Pierre du Niton (R P N) donne :

Hautes eaux de 1816 R P N — 0.193m
— — 1817 R P N — 0.119m

Le sommet de la Pierre du Niton étant à un pouce, soit 27mm, au-dessus du repère, nous pouvions croire que, dans ces deux années, le bloc erratique du port de Genève n'avait pas été submergé, et devait être resté découvert de 22cm en 1816, et de 15cm en 1817.

Aussi grand a été notre étonnement quand, dans la séance du 20 juin 1882, les avocats de l'Etat de Genève ont fait défiler, devant la délégation et les experts du Tribunal fédéral, une vingtaine de témoins oculaires, tous vieillards de quatre-vingts ans environ, tous vaillants et diserts, le vénérable professeur D. Colladon à leur tête ; tous nous

(1) *F.-A. Forel.* Limnimétrie du Léman. *Ibid.* 298.
(2) *Ibid.* 300.

ont affirmé avoir vu la Pierre du Niton submergée par les eaux de 1816 et 1817. Les détails des témoignages variaient bien un peu, quelques dépositions étaient trop précises, d'autres évidemment exagérées ; mais l'affirmation générale était concordante, et nous avons dû admettre qu'effectivement les inondations de 1816 à 1817 avaient recouvert la petite Pierre du Niton.

J'ai souvent cherché l'explication de cette divergence entre des témoignages aussi valables les uns que les autres, quoique d'un ordre fort différent ; j'ai invoqué la possibilité de dénivellations accidentelles dues à l'action des vents, à des seiches, etc. J'en suis actuellement à me demander s'il n'y aurait pas eu affaissement local ou général de l'extrémité orientale du lac, ou soulèvement local de son extrémité occidentale. Dans le premier cas, ne serait-ce peut être pas la continuation du mouvement d'affaissement qui, dans notre hypothèse, a donné naissance au lac Léman ? Je me borne à poser ici la question, attendant la réponse quand, dans cinquante ou cent ans, nos successeurs répèteront, sur les rives du lac, le nivellement de précision exécuté pour la première fois en 1865.

Quoi qu'il en soit je continue la discussion de notre hypothèse de l'affaissement général des Alpes succédant à la phase de surexhaussement. La région alpine s'affaissant, la pente de la vallée a d'abord diminué, elle s'est réduite à zéro, puis elle s'est changée en une contrepente et les eaux sont devenues stagnantes. Des lacs se sont formés dans toutes les grandes vallées traversées autrefois par des eaux courantes. Pour ne parler que de la vallée du Rhône, le Léman s'est alors formé et s'est étendu dans la vallée du bas-Valais.

Quelles ont été les limites alpines du lac, quel a été le point d'origine du Léman dans la vallée du Valais ? La réponse théorique à cette question est bien facile : c'est le point où le plan horizontal de la nappe des eaux du lac coupait le plan oblique du plafond de la vallée.

La réponse géographique est plus indécise ; car nous sommes dans l'incertitude sur la hauteur de la nappe du lac, sur la position et la forme du plafond de la vallée, et enfin nous ne pouvons savoir s'il y a eu des mouvements partiels locaux, ou si les mouvements généraux ont été partout uniformes. Néanmoins nous pouvons faire quelques suppositions admissibles, et voir à quoi elles nous amènent.

Quelle était l'altitude de la nappe horizontale du vieux Léman valai-

san ? — Evidemment la même que celle du Léman de la plaine suisse. Pour celle-ci, nous avons une cote donnée par les anciennes terrasses lacustres, terrasse dite de trente mètres, terrasse des Tranchées de Genève, de St-Prex, du Boiron, etc. Ce plan, à l'altitude de 405^{m} environ, passe en contrebas du plafond actuel de la vallée :

de	0^{m}	à Massongex	alt. 405^{m}
—	25^{m}	au haut des rapides du Bois-noir	— 430^{m}
—	130^{m}	au pont du Rhône sous Sierre	— 535^{m}
—	195^{m}	au Rhône à la Souste près Louèche	— 600^{m}
—	290^{m}	à l'embouchure de la Massa	— 695^{m}

Nous ignorons quelles étaient les allures de la vallée primitive du Rhône dont le plafond est masqué par les alluvions du fleuve. Dans cette ignorance, nous en sommes réduits à supposer qu'elle a été un plan régulièrement incliné depuis l'embouchure de la Massa, altitude 695^{m}, jusqu'au plafond du lac, dans la plaine centrale du Léman débarrassée de ses alluvions modernes, disons à l'altitude 0^{m}, soit au niveau de la mer. La distance entre ces deux points est de 121^{km}, cela donne une pente moyenne de 5.3 $^{00}/_{00}$. En répartissant cette pente sur les points principaux du parcours, nous arrivons aux altitudes suivantes pour le plafond du Rhône primitif, et à sa profondeur sous le plafond de la vallée actuelle :

	distance km.	altitude du plafond primitif.	profondeur sous le plafond actuel.
Plafond du lac, profil Ouchy-Evian	—	0^{m}	63^{m}
Massongex	34.0	194	209
Au haut des rapides du Bois-noir	5.8	227	203
Pont de Sierre	51.5	521	14
A la Souste	8.2	569	31
Embouchure de la Massa	22.0	695	0

Si je cherche quel est le point où le plan horizontal de 405^{m}, altitude probable de la nappe du Léman primitif, coupe le plan incliné ainsi dessiné, je le trouve à 5^{km} en aval de Sion, à l'embouchure de la Morge de Conthey. Ce serait là que, dans les suppositions admises, le vieux Rhône primitif aurait eu son embouchure dans le vieux *Léman valaisan*. Ce lac se serait étendu en une nappe longue et étroite par Martigny, la cluse de St-Maurice où il aurait eu un défilé pittoresque, la plaine actuelle du bas Rhône, jusqu'au Léman actuel et à Genève. C'était alors un lac de 130^{km} de long.

Où était alors l'extrémité inférieure du Léman? — Qu'est-ce qui déterminait le point où le lac s'arrêtait et où il se transformait en un émissaire fluvial? A première vue il semble que ce devait être au point où se limitait l'affaissement de la région alpine, sur la ligne où, par cet affaissement, se formait la contrepente qui changeait la vallée fluviatile originelle en un bassin lacustre. Il est probable qu'il en a été ainsi à l'origine; mais cela n'a été qu'un état transitoire, et un seuil plus stable a dû s'établir, si nous ne nous trompons, dans de tout autres conditions.

Si je considère en effet la géographie des lacs de notre région, j'y retrouve partout, presque sans exception, un fait très caractéristique: à quelques centaines de mètres, à quelques kilomètres à peine au-dessous de l'origine de l'émissaire, nous voyons une rivière torrentielle se déverser dans la vallée principale. La vieille Linth à 2^{km} du lac de Wallenstadt, la Sihl à 1.5^{km} du lac de Zurich, l'Emme à 2^{km} du lac des Quatre-Cantons, la vieille Lütschine à 2^{km} du lac de Brienz, la vieille Kander à 4^{km} du lac de Thoune, le Fier à 4^{km} du lac d'Annecy, l'Arve à 2^{km} du lac Léman. Ailleurs, là où le lac est dans une vallée latérale, c'est le fleuve principal qui vient recevoir l'émissaire après un court trajet. C'est ainsi que le Rhône court à 2.6^{km} du lac du Bourget, l'Aar à 7^{km} du lac de Bienne, la Toce à 7^{km} du lac d'Orta, l'Emme à 8.5^{km} du lac de Zoug, et il semble qu'on puisse dire de même, mais à une plus grande distance, le Pô au-dessous de la sortie des grands lacs de l'Italie septentrionale. Les seules exceptions que j'aie à citer dans nos grands lacs sont d'une part les lacs de Neuchâtel et de Morat, mais ils forment un seul bassin lacustre avec le lac de Bienne, et d'autre part le lac de Constance, dont le déversoir actuel est latéral et n'est point sur l'axe de la vallée. Un fait aussi général et aussi constant doit avoir une cause commune. Cette réflexion m'amène à étudier l'effet des barrages d'alluvion.

Nous n'insisterons pas longtemps sur la formation des lacs dans les vallées latérales par le fait de la surélévation alluviale de la vallée principale; une telle action n'a rien à faire avec la genèse du Léman. C'est du reste très simple. Une cause quelconque force le fleuve à exhausser son lit: que ce soit un soulèvement local ou la formation d'un barrage d'alluvion sur son cours aval, que ce soit l'allongement de son cours inférieur par retraite de la mer ou soulèvement général du continent, que ce soit simplement l'allongement de son cours par l'avancement de son delta à l'embouchure dans la mer ou dans un lac, le

fleuve cesse d'éroder et de creuser son lit; il dépose de l'alluvion sur le plafond de sa vallée; cette vallée se comble et se surexhausse (exemple le relèvement progressif du lit du Pô). Les affluents latéraux ne participent pas nécessairement à ce surexhaussement; leurs eaux ne s'écoulent plus librement dans le fleuve principal: elles deviennent stagnantes et il se forme un lac à la partie inférieure de chaque vallée affluente. Un exemple d'une telle formation nous est donné, semble-t-il, par le lac du Bourget en Savoie. A en juger par la largeur et le peu de pente de la plaine dans laquelle le Rhône circule de Seyssel à Culoz et à Yenne, il paraît permis d'admettre que le Rhône s'était autrefois creusé un lit à quelques centaines de mètres plus bas et que la vallée de Chambéry à Culoz était une vallée latérale dont les eaux couraient librement jusqu'à la vallée principale. Par une cause quelconque le cours du Rhône s'est ralenti, les alluvions se sont déposées et ont comblé la vallée; son lit s'est surexhaussé, formant barrage à l'entrée de la vallée du Bourget, dont les eaux se sont arrêtées et ont rempli la cuvette de 145^{m} de profondeur du lac. L'ancienne rivière s'est transformée dans le canal de Savières, émissaire du lac. Quant aux alluvions du Rhône, elles ont été poussées à chaque crue d'inondation dans la direction du lac du Bourget, elles y ont formé un delta accidentel en se déversant dans le lac, et c'est ainsi que s'est constituée la petite plaine de 3^{km} de long des marais de Chautagne, entre le Rhône de Culoz et le lac du Bourget. Je n'insiste pas. Si cette interprétation est exacte, c'est trop simple.

La formation d'un barrage par l'alluvion d'un torrent latéral sur le cours du fleuve principal peut se comprendre comme suit: Considérons un fleuve circulant majestueusement dans sa vallée avec une pente faible, la pente normale d'un fleuve de plaine. Avec une telle pente et le volume de ses hautes eaux, sa faculté de transport est telle que du sable d'une grosseur donnée est charrié sur son lit; il y a une relation stable entre la pente du fleuve, le débit de ses hautes eaux et la masse des grains de sable qui circulent sur son lit. Un torrent survient qui se fraie un passage jusqu'à ce fleuve et y déverse ses graviers. Ce torrent charrie dans ses crues une quantité d'eau considérable, sa pente est fort inclinée, la vitesse de ses eaux est grande, et celles-ci transportent de gros matériaux. Ceux-ci sont jetés dans le lit du fleuve et l'obstruent. Mais le fleuve, lui, est incapable de charrier des cailloux aussi pesants; ces galets dépassent sa faculté de trans-

port; ils resteront donc sur place, et, encombrant son lit, finiront par établir un barrage de plus en plus élevé. Ce barrage s'exhaussera jusqu'à ce que le rapide, formé par le fleuve sur le talus inférieur de la digue, ait acquis une vitesse suffisante pour entraîner les galets amenés par le torrent et les distribuer sur sa pente ainsi modifiée.

Suivant les circonstances un tel barrage produira des accidents géographiques différents. Si un torrent de grosse alluvion se déverse dans le trajet d'un fleuve, à cours bien réglé, à faible pente, à alluvion très fine, il établira un rapide qui exagèrera la pente du fleuve dans ce qu'on peut appeler le cône d'alluvion du torrent; il amènera l'exhaussement de la partie supérieure de la vallée et le dépôt d'alluvion fluviale par suite de la diminution de la pente du fleuve et de la réduction de sa faculté de transport. Ainsi les rapides du Rhône sur les cônes d'alluvion de l'Illgraben près de la Souste, et du torrent de St-Barthélemy au Bois-noir de St-Maurice.

Si un tel torrent vient se verser par le travers d'un lac, il coupera ce lac en deux, dont l'un, le lac supérieur, sera d'autant surélevé sur l'inférieur que l'alluvion du torrent sera plus grossière et que le cône d'alluvion sera plus étendu. Ainsi le cône de la Lütschine à Interlaken soutient le lac de Brienz et le sépare du lac de Thoune; ainsi le cône de la Linth soutient le lac de Wallenstadt et le sépare du lac de Zurich.

Si un tel torrent, qui déversait autrefois ses eaux dans un lac d'une vallée latérale et en sortait sans charrier d'alluvion, amène tout à coup cette alluvion dans le fleuve principal, une fois le lac latéral comblé, il peut s'établir un barrage assez élevé pour occasionner une contre-pente sur la vallée principale et former un lac de barrage. Je n'ai point d'exemple à citer, (¹) mais je tiens la combinaison pour possible.

C'est à des faits de cette nature que j'attribue l'établissement de la barre ou digue qui soutient la plupart des lacs subalpins suisses, et en particulier le lac Léman. L'Arve est certainement pour une part importante dans l'arrêt de notre lac à Genève, à 2^{km} au-dessus de son confluent avec le Rhône. Quel a été le mécanisme précis de cette action? Je ne veux pas essayer de le dégager au milieu de l'enchevêtrement confus des faits à nous inconnus qui ont précédé, accompagné et suivi la genèse du lac Léman. Il ne serait pas difficile d'établir le cane-

(¹) *Heim* en indiquait un en 1878 dans la vallée supérieure de Wäggi, qui était barrée par les alluvions de la Schlieren; le lac se relevait chaque année. (*Heim*, Mechanismus, etc., p. 318 (note).

vas d'un enchaînement plausible d'événements ; mais dans une théorie aussi compliquée que celle qui nous occupe, nous sommes déjà entraînés à trop de suppositions ; je désire me borner au strict nécessaire. Je me permettrai seulement deux observations générales.

La première, c'est que les alluvions de l'Arve se sont toujours déversées à peu près au même endroit depuis qu'il existe une Arve, c'est-à-dire dès la première émergence des Alpes de la Savoie. De même qu'il y a eu un Rhône valaisan tertiaire, avant notre Rhône quaternaire, de même l'Arve a, dans la série des âges géologiques, drainé le versant occidental du massif du Mont-Blanc qui s'exhaussait progressivement; elle a amené ses débris dans la mer tertiaire de la plaine suisse ; sitôt que la plaine a été exondée, ses alluvions sont devenues des dépôts à l'air libre ; dès qu'un Rhône s'est creusé un lit dans la direction de Bellegarde, l'Arve y est venue décharger ses sables et ses galets. La région de Genève a donc, dès les origines de ces fleuves, été le confluent du Rhône et de l'Arve ; elle a toujours été le point où l'alluvion torrentielle de l'Arve a été jetée dans le lit de la vallée principale. Cette région a donc de tout temps été un point d'arrêt, un obstacle au cours libre du fleuve. Sauf dans les temps probables où l'Arve présentait sur son parcours un ou des lacs analogues à ceux des autres fleuves alpins, il y a toujours eu tendance à la formation, à Genève ou près de Genève, d'un barrage d'alluvions alpines de la rivière torrentielle du Faucigny. Ce n'est donc pas seulement à l'époque de l'affaissement des Alpes, mais déjà dans la phase antérieure de surexhaussement qu'il faut tenir compte des alluvions de l'Arve sur le cours du Rhône à Genève.

Ma seconde observation justifiera l'importance plus grande que j'attribue, pour l'arrêt inférieur du lac Léman, à l'action des alluvions de l'Arve plutôt qu'à celle de la limite de la région d'affaissement du massif alpin. Un barrage formé par un fait de soulèvement local sur le cours inférieur d'un fleuve, ou d'affaissement du cours supérieur est un obstacle transitoire et passager. Il est soumis à l'érosion continue de l'eau courante, et il ne doit pas tarder à disparaître ; il peut bien arrêter pour un temps les eaux fluviales et les rendre stagnantes, mais sitôt qu'il est établi, l'érosion doit commencer à l'attaquer, et cette action destructive, fonctionnant toujours dans le même sens, doit bientôt arriver à le supprimer. Un tel barrage ne peut pas avoir une durée considérable, et un lac soutenu par une telle digue

doit être un fait géologique relativement temporaire ; — les faits temporaires en géologie peuvent durer des siècles, cela est vrai. — Au contraire, un barrage dû à l'alluvion d'un torrent est un fait permanent, qui se rétablit aussitôt qu'il a été accidentellement détruit par l'érosion ; chaque crue apporte de nouveaux matériaux. Les conditions locales, en s'altérant, peuvent bien le modifier, amener quelques changements en plus ou en moins, le déplacer de quelque peu ; mais c'est un fait relativement constant et de grande persistance ; tant que la rivière se déversera dans le fleuve, elle y apportera son alluvion. C'est à cette persistance et permanence que j'attribue la grande importance de ce fait géologique des barrages torrentiels, valeur démontrée par son apparition à la sortie de tous nos grands lacs.

Il est probable que les phénomènes de soulèvement et d'affaissement du sol ont été dominants dans l'établissement de la digue originelle qui a arrêté les eaux des fleuves alpins et les a transformés en lacs. Mais ces digues n'ont été que temporaires, et elles n'ont persisté que là où elles ont été soutenues et complétées par des barrages d'alluvion, phénomène permanent, parce qu'il se rétablit sans cesse. La sortie des lacs était à l'origine au point de soulèvement relatif ; elle s'est déplacée pour s'établir définitivement au point où l'alluvion d'un torrent latéral a constitué une digue persistante. Si je ne fais pas trop grave erreur dans le développement de mon hypothèse sur la genèse de notre lac, je suis donc fondé à placer l'extrémité inférieure du Léman primitif à la limite de la région d'affaissement du massif alpin, en un point à nous inconnu, probablement entre Genève et Bellegarde, peut-être près du moulin de Vernier, et à la remplacer ultérieurement par le barrage actuel, formé par les alluvions de l'Arve qui se déversent dans le lit du Rhône.

Phase de comblement du lac. Je serai bref sur cette phase de l'histoire du lac ; elle ne présente aucune difficulté. Nous aurons cependant à y distinguer deux actions différentes : l'une le comblement du lac par les alluvions fluviales, l'autre l'abaissement de la nappe du lac.

Nous sommes en présence d'un Léman qui remplissait toute la vallée du Rhône, depuis Sion jusqu'à Genève ; sa profondeur, nulle à l'extrémité orientale, allait en augmentant jusqu'à un point à nous inconnu, pour diminuer ensuite jusqu'au seuil de l'émissaire. Sa largeur

était en Valais celle de la vallée du Rhône, dans la plaine suisse celle du Léman actuel. Il ne possédait qu'un seul golfe un peu considérable qui remplissait le bas de la vallée de la Dranse de Martigny et quelques petits fiords dans les vallées de la Venoge, l'Aubonne, la Drance de Thonon, etc. A son extrémité orientale se versait le Rhône, fleuve glaciaire dont les eaux estivales charriaient une grande charge d'alluvion ; sur ses flancs se jetaient des rivières et torrents, la Lizerne, la Dranse de Martigny, le Trient, l'Avençon, la Grionne, la Viège du val d'Illiers, la Grande-Eau, plus tous les affluents actuels du lac. Tous apportaient leur alluvion dans le lac et travaillaient chacun pour son compte à le combler.

Le plus actif, de beaucoup le plus puissant, était le Rhône, qui poussait son delta suivant l'axe de la vallée, et le faisait avancer toujours plus loin, en raccourcissant d'autant le lac. Depuis le début de cette phase de comblement jusqu'à nos jours, l'embouchure de ce delta s'est déplacée de quelque soixante kilomètres. Mais en même temps qu'un fleuve affluant dans un lac avance son delta, son action d'atterrissement se manifeste aussi dans sa vallée supérieure ; à mesure qu'il prolonge son cours terrestre, sa pente diminue, et atteint bientôt la limite au-delà de laquelle il commence à déposer de l'alluvion. Il forme des couches d'alluvion non seulement dans le lac, mais encore dans le bas de sa vallée, qu'il relève de proche en proche par des couches peu inclinées d'alluvion fluviatile. C'est ainsi que, dans nos suppositions, le Léman valaisan ne s'étendait pas au-delà de la Morge de Conthey, et que sa nappe y était d'une centaine de mètres au-dessous du plafond actuel. L'action indirecte du comblement s'est prolongée jusque dans le Haut-Valais, peut-être jusqu'à Brigue; elle y a relevé le plafond de la vallée dans des proportions moindres, mais de la même manière qu'elle a relevé le sol de la plaine de Martigny, au-dessus de la nappe du lac.

A cette action de comblement longitudinal s'est jointe l'action des affluents latéraux, qui, chacun à sa manière, ont contribué à combler le lac. Les uns y apportaient surtout une alluvion impalpable qui se disséminait à de grandes distances, les autres une alluvion grossière qui se déposait dans le lac à l'embouchure du torrent. Ces derniers tendaient à couper le lac et à le diviser en bassins superposés. Le plus actif à ce point de vue a été probablement le torrent de St-Barthélemy, en amont de St-Maurice, dont les crues peu fréquentes, mais

d'une puissance extraordinaire, amènent en quelques heures des masses énormes de matériaux rocheux, caillouteux et boueux ; le cône gigantesque du Bois-Noir est la preuve de l'intensité de ce transport. Dans la catastrophe du 26 août 1835, le Rhône entraînait ces matériaux à mesure de leur apport et les disséminait sur son lit ; quand cette masse boueuse tombait directement dans le Léman valaisan, elle l'a probablement bientôt encombré d'un barrage, qui l'a divisé en deux lacs : le lac de Martigny arrivant jusqu'au Bois-Noir, le lac inférieur commençant au-dessous du barrage. La grosseur des pierres qui encombrent le lit du Rhône au Bois-Noir fait que le rapide est beaucoup plus incliné que ne le sont les barres d'alluvion qui séparent les lacs de Brienz et de Thoune, ou de Wallenstadt et de Zurich. La différence de niveau entre les deux lacs était de 20 à 25^{m}.

Une fois le Léman ainsi séparé en deux lacs, le lac supérieur, qui était le moins profond et le moins large, et qui recevait toutes les alluvions du Rhône, de la Dranse, du Trient, rivières glaciaires, et de nombreux torrents accessoires, n'a pas tardé à se combler. Plus tard seulement est venu le remplissage de la partie orientale du lac inférieur, jusqu'à la passe de St-Maurice d'abord, puis jusqu'aux embouchures des divers torrents de la plaine du Rhône, puis enfin jusqu'à la rive actuelle du lac.

Nous avons des exemples de ce sectionnement d'un lac en bassins échelonnés dans les lacs de Brienz et de Thoune, déjà nommés, dans le petit lac de Mezzola, déjà séparé du Lario par les alluvions de l'Adda, dans le lac Majeur, où le cône de la Maggia séparera dans quelques siècles le lac de Locarno du Verbano ; ou encore au lac des Quatre-Cantons, où les alluvions de la Muotta forment une barre sous-lacustre actuellement à 93^{m} de profondeur, séparant les deux bassins supérieurs du lac, l'un profond de 200^{m}, l'autre de 214^{m}.

Si cela est, des puits forés dans la plaine du Rhône, aussi bien dans celle d'Aigle que dans celle de Martigny, traverseraient d'abord des couches peu inclinées d'alluvion fluviale ou torrentielle, puis au-dessous des couches horizontales d'alluvion lacustre, et arriveraient enfin à la roche en place sur le lit primitif de la vallée. Ces mêmes forages pratiqués à l'embouchure des affluents latéraux du lac valaisan ne toucheraient que tout au fond une couche très faible d'alluvion lacustre ; avant d'y arriver ils traverseraient, au-dessous des couches peu inclinées de l'alluvion fluviale déposées à l'air libre, les couches très

inclinées de ces mêmes alluvions déposées dans le lac, sur le talus des deltas submergés du lac primitif.

En même temps que s'accomplissait ce procès de comblement, un autre événement avait lieu qui tendait, dans un autre sens, à modifier le Léman. L'étude des terrasses lacustres sur les rives du lac nous a montré qu'à l'origine, peu de temps après l'époque glaciaire, — le mammouth et le renne vivaient encore chez nous, — le niveau du lac était à une hauteur fort supérieure au niveau actuel. Les terrasses fluvio-lacustres des Tranchées de Genève, du Boiron de Morges, etc., sont à la cote actuelle de 405^{m}. Une terrasse moyenne, à 385^{m}, se montre en quelques endroits ; le niveau du lac est aujourd'hui à 375^{m}. Par des phénomènes dont le détail nous est inconnu, mais que nous pouvons attribuer à l'érosion, l'émissaire du lac abaissait son niveau et la nappe du Léman descendait, après quelques stades intermédiaires, de 30^{m} environ. Il est difficile de préciser l'époque où s'est passé cet événement ; tout ce que nous pouvons dire, c'est qu'il s'est écoulé un temps assez considérable depuis l'origine du lac jusqu'à la chute de son niveau, car les terrasses lacustres de 30^{m} ont une fort grande étendue et un volume considérable de remblai. D'un autre côté, il y a fort longtemps que ce fait s'est passé, car c'était avant l'époque archéologique de l'âge de la pierre néolithique. Jusqu'où s'étendait encore le Léman valaisan, quelle partie en avait déjà été comblée lorsque est survenue cette crise dans l'histoire du lac ? Nous ne le saurions que s'il était possible de faire une tranchée en longueur des alluvions de la vallée du Rhône, et d'en étudier la superposition des couches et des niveaux. Cela ne nous sera jamais donné. Nous devons donc nous résigner à notre ignorance à cet égard. Heureux serions-nous si quelque découverte ou trouvaille géologique arrivait à confirmer, corriger ou remplacer les suppositions et déductions auxquelles nous en sommes réduits aujourd'hui.

Nous retrouvons une plaine analogue à la plaine du Rhône valaisan dans la partie inférieure de toutes les vallées des Alpes qui aboutissent aux lacs subalpins, plaine de l'Aar, plaine de la Reuss, plaine de la Limmat, plaine du Rhin, plaine du Tessin, de l'Adda, etc. ; nous en constatons de même dans les vallées où les lacs manquent actuellement, mais où nous pouvons supposer qu'ils ont existé autrefois et ont été comblés, vallées de l'Arve, de l'Isère, de l'Adige, etc. L'origine de ces diverses plaines doit s'expliquer de la même manière que nous

venons d'étudier. Je ne veux pas dire que l'on ne puisse en rendre raison par d'autres théories. Mais, notre hypothèse en donnant une explication très satisfaisante, nous avons le droit de les invoquer comme preuves à l'appui de notre théorie de la genèse du Léman.

Le Petit-lac. Si nous étudions la carte hydrographique des lacs de Thoune, de Brienz, de Wallenstadt, du Bourget, nous constatons que leur bassin est formé d'un seul jet, que leur profondeur décroît régulièrement depuis la plaine de profondeur maximale jusqu'au pied du talus des deux extrémités. On peut dire que c'est là le type d'un lac normal. Il en serait de même du Léman s'il se terminait à Yvoire et Promenthoux ; le bassin du Grand-lac est aussi régulier que celui des lacs susnommés. Mais le Léman ne s'arrête pas à Yvoire ; il continue jusqu'à Genève. Il a, sous forme d'un appendice, le Petit-lac dont la structure est toute différente. Plus étroit : la largeur du Grand-lac étant de 10 à 13^{km}, elle descend dans le Petit-lac à 4 ou 4.5^{km} ; moins profond : la profondeur diminue notablement au-delà de la barre de Promenthoux, et ne dépasse pas 75^{m} devant Nyon ; moins régulier : dans le Petit-lac, au lieu d'un bassin unique nous trouvons une série de cuvettes, très peu profondes il est vrai, presque planes, séparées par des barres peu saillantes, mais assez évidentes cependant pour que nous puissions en décrire trois ou quatre jusqu'à Genève.

Ces différences sont assez marquées pour que tous les auteurs aient cherché au Petit-lac une origine différente de celle du Grand-lac. Favre et Desor en faisaient un lac de vallon (lac orographique de vallée synclinale) ; Brückner un lac d'érosion glaciaire tardive ; Rütimeyer un lac d'érosion secondaire creusé après le soulèvement du Mormont et après l'ouverture de la cluse du Vuache ; [1] moi-même, en complétant l'hypothèse de Rütimeyer, j'en aurais fait un lac d'érosion de l'Arve, si j'avais pu admettre que le Rhône se fût, à l'époque du grand creusement du lac, écoulé dans la direction du lac de Neuchâtel.

Si je reprends mon hypothèse fondamentale, qui fait du Léman une partie affaissée consécutivement de la vallée d'érosion d'un Rhône qui allait se jeter dans la Méditerranée en passant par Bellegarde, j'ai à expliquer les différences de structure entre la partie occidentale du Petit-lac et le Grand-lac. Pourquoi le bassin unique et uniforme du

[1] Notons à ce sujet que le fond actuel de la cuvette de Nyon dans le Petit-lac est de quelques mètres inférieur en altitude au seuil actuel de Bellegarde qui est à 309^{m} au-dessus de la mer, de 65^{m} inférieur au seuil de Vernier, altitude 364^{m}.

Léman ne s'est-il pas continué sans modifications jusqu'à Genève? J'ai deux explications à proposer :

Ou bien j'invoquerais des irrégularités dans l'affaissement de la vallée à la limite extérieure de la zone alpine. S'il y a eu, comme je le suppose, un affaissement général du massif alpin, il serait très compréhensible que, sur les bords de la région affectée par ce mouvement, il y ait eu des ruptures, des fractures, des inégalités, et que le plafond de la vallée y ait perdu la régularité qu'elle possède ailleurs.

Ou bien je ferais appel à un comblement ultérieur de la vallée par des dépôts glaciaires, consécutivement au creusement par érosion de la vallée, consécutivement au mouvement d'affaissement qui l'a transformée en lac. Cela me paraît mieux cadrer avec les faits connus : avec ce que nous voyons sur terre ferme où les énormes dépôts d'alluvion morainique du signal de Bougy et d'Evian-Thonon forment les deux bras d'un gigantesque fer à cheval dont la barre de Promenthoux représenterait la partie transversale; avec la nature morainique du sol que j'ai constatée au milieu de la barre de Promenthoux, devant Yvoire; avec la nature évidemment morainique de certaines barres du fond du lac des Quatre-Cantons, barre du Kindli-mord, barre des Nases.(1) Il y aurait eu, dans la grande phase de décrue de la période glaciaire multiséculaire, un temps d'arrêt, une poussée en avant ou un état stationnaire prolongé du glacier, pendant lesquels se seraient déposées des moraines frontales, en retraite les unes sur les autres. De là les inégalités du sol du Petit-lac et les cuvettes successives de son bassin. N'allons cependant pas trop loin. Les barres qui séparent les diverses cuvettes du Petit-lac sont extrêmement peu saillantes et n'ont en rien la forme de moraines; s'il y a eu réellement là des moraines, celles-ci sont cachées sous une couche puissante d'alluvion lacustre qui en masque complètement le relief.

Entre ces deux explications je penche plutôt vers la seconde. L'une et l'autre me paraissent suffisantes pour rendre compte des faits, et ne pas demander de plus longs développements.

Dates géologiques de la genèse du Léman. Ce que nous avons exposé longuement dans le cours de ce chapitre nous permettra d'être

(1) *F.-A. Forel.* Carte hydrographique du lac des Quatre-Cantons. Arch. Genève, XVI, 5 sq. 1886.

bref pour ces questions intéressantes et importantes; d'autant plus bref que les réponses que nous aurons à donner devront nécessairement se tenir dans un vague prudent. Nous avons trois phases à considérer ; comment pouvons-nous localiser ces événements dans la chronologie géologique suisse ? Voici les faits qui peuvent, semble-t-il, être établis.

Phase d'exhaussement et de surexhaussement des Alpes. Creusement des grandes vallées.

a La vallée alpine du Rhône doit avoir débuté avec les premiers soulèvements des Alpes, s'être maintenue sur le même tracé et s'être approfondie à mesure que l'exhaussement des Alpes s'accentuait. Elle est le développement de la première rigole de ravinement, que les pluies ont dessinée à la surface de la première terre émergée dans la région ; une fois le sillon indiqué, il n'a pu que se perfectionner, et n'a pas dû se déplacer sensiblement ; tout au plus les phénomènes tectoniques du soulèvement de la chaîne bernoise ont-ils aidé à lui donner la régularité qui en fait la plus belle vallée longitudinale des Alpes. C'est ce qui résulte des notions admises sur la puissance et l'efficacité de l'érosion. Par cela les premières origines de la vallée du Rhône doivent être reportées peut-être déjà dans l'ère secondaire.

b Le creusement du ravin dans la plaine suisse, en prolongation de la vallée du Rhône valaisan ne peut avoir commencé qu'après l'époque helvétienne du miocène, où une partie des murailles de la vallée du Léman étaient encore sous le niveau de la mer.

c A mesure que les Alpes se surexhaussaient, la vallée s'approfondissait de plus en plus. Quel a été le moment du maximum de surexhaussement, celui où la vallée du Rhône a été poussée jusqu'à la hauteur relative du plafond du lac Léman ? Nous ne le savons pas avec certitude, à moins que nous ne poussions plus loin l'hypothèse comme je vais bientôt le montrer.

Phase d'affaissement amenant l'état stagnant des eaux dans la partie supérieure de la vallée. Quand cette phase a-t-elle commencé, à quand devons-nous rapporter ce mouvement d'affaissement qui a été la cause première de la formation définitive du lac ? Nous l'ignorons, nous ne pouvons le préciser. Nous allons dans un instant hasarder une hypothèse ; mais pour ne parler à présent que des choses certaines, tout ce que nous pouvons dire c'est que la fin de cette phase d'affaissement a été antérieure à la fin de l'époque glaciaire ou au commen-

cement de l'époque moderne. Les terrasses lacustres post-glaciaires sur les bords du Léman sont horizontales, ou à peu près ; rien n'indique qu'il y ait eu de grands affaissements dans l'époque géologique actuelle.

C'est donc entre la fin de l'époque helvétienne d'une part et le commencement de l'époque moderne que nous devons placer d'abord le surexhaussement des Alpes, puis l'affaissement qui les a ramenées aux altitudes actuelles.

Quant à la phase de comblement du Léman valaisan, elle a rempli toute l'époque géologique moderne et se continue de nos jours dans le Léman actuel.

Voilà des dates et des faits certains pour qui admettra notre théorie.

Mais ne pouvons-nous pas aller plus loin, préciser mieux les dates du surexhaussement et de l'affaissement du massif Alpin ? Ne devons-nous pas les relier avec ce que nous savons du grand événement géologique quaternaire, l'époque glaciaire ? Ce sera greffer une hypothèse sur une autre ; je n'en ai pas besoin pour établir mes idées sur l'origine du Léman ; c'est donc inutile, et je ferais peut-être mieux de m'arrêter ici. Mais les choses s'enchaînent et s'expliquent si naturellement que je ne sais pas résister à la tentation de les exposer, en faisant toutes les réserves nécessaires sur leur caractère purement hypothétique. Je le répète, c'est un complément d'hypothèses que l'on peut accepter ou rejeter sans compromettre en rien la théorie de la genèse du lac Léman.

Nous affirmons un premier énoncé: Le surexhaussement des Alpes, dont nous croyons avoir démontré la probabilité, serait une cause suffisante de l'époque glaciaire dans notre pays.

Une surélévation convenable des Alpes suffirait à expliquer la grande extension des glaciers quaternaires dans notre contrée, sans que nous ayons à faire appel à d'autres changements climatologiques ou cosmiques. C'est l'ancienne hypothèse, la première idée de Charpentier, (1) qui l'a abandonnée plus tard. Si le massif des Alpes, si la contrée toute entière était soulevée de mille mètres, la limite des neiges serait immédiatement abaissée d'autant sur les pentes de ces mon-

(1) Notice sur la cause probable du transport des blocs erratiques en Suisse. Ann. des mines, 3me série, VIII, 234. Paris 1835.

tagnes ; l'altitude de la limite des neiges passant dans nos latitudes à peu près à 2800^{m}, les points qui sont actuellement à 1800^{m} seraient portés à l'altitude où les neiges de l'hiver ne sont pas liquéfiées par la chaleur de l'été subséquent. D'immenses névés rempliraient bientôt les vallées aujourd'hui dégarnies de neiges et y constitueraient une alimentation puissante pour les glaciers ; des montagnes aujourd'hui dépourvues de glaciers s'en chargeraient ; de nouveaux affluents se joindraient ainsi aux fleuves glacés qui descendraient en conséquence bien plus bas dans les vallées. L'alimentation étant beaucoup plus puissante, le débit du glacier étant notablement accru, l'extrémité terminale serait chassée beaucoup plus loin dans la plaine ; elle descendrait non pas de mille mètres plus bas que les points où s'arrête le front actuel des glaciers, mais peut-être de quinze cents, de deux mille mètres. Si le Valais tout entier était soulevé de mille mètres, les glaciers du bassin du Rhône descendraient jusqu'au lac Léman.

Le surexhaussement des Alpes aurait donc un effet primaire que je caractériserai ainsi : soulèvement dans la région des neiges de montagnes et de vallées qui étaient auparavant au-dessous de cette limite. A cet effet primaire doit s'ajouter un effet secondaire tout aussi efficace et puissant pour la création de grands glaciers, l'abaissement absolu et non pas seulement relatif de la limite des neiges. En voici la raison :

La superficie des névés et celle des glaciers étant considérablement augmentée par effet primaire de la surélévation de la contrée, le climat local serait refroidi. Si la superficie du pays enneigé était doublée ou triplée, cette immense surface de glaces réagirait sur l'atmosphère ambiante et en abaisserait la température ; les lignes isothermes sont infléchies par une surface glacée et rapprochées de l'équateur, comme elles sont relevées et rapprochées du pôle par la même surface couverte d'eau libre ou de terrain dégarni de neiges. Par action de voisinage, la masse glacée, surétendue par effet primaire du surexhaussement, produirait un effet secondaire d'abaissement de la limite des neiges. Dans l'état actuel des choses, avec 1000^{km2} de neiges éternelles en Valais, la limite des neiges est à l'altitude de 2800^{m} ; si un surexhaussement du sol portait à deux ou trois mille kilomètres carrés cette surface enneigée, la limite des neiges descendrait peut-être à 2500^{m}, à 2200^{m}, peut-être plus bas. Il en résulterait une exagération, un accroissement secondaire de la surface enneigée, et par conséquent de la puissance d'alimentation des glaciers.

Il ne paraît pas que ce soit évaluer trop haut l'efficacité de ces deux effets, primaire et secondaire, d'un surexhaussement du massif des Alpes, que de les invoquer comme causes possibles de l'extension énorme des glaciers que notre pays a subie au début de l'ère quaternaire. Si l'époque glaciaire était limitée aux Alpes seules, personne n'hésiterait à l'expliquer simplement par une surélévation de la contrée. Un surexhaussement de mille mètres serait, semble-t-il, probablement suffisant. Inversement, l'affaissement ultérieur des Alpes, qui nous est indiqué par l'établissement d'une contrepente dans les vallées d'érosion, aurait pour conséquence nécessaire le relèvement relatif et absolu de la limite des neiges, la réduction d'alimentation des glaciers, leur décrue, en un mot la fin de l'époque glaciaire. Si nous n'avions à considérer que la Suisse, ou plutôt les Alpes et les régions subalpines, les faits s'enchaîneraient très simplement en :

Une première phase : Surélévation des Alpes, développement de l'époque glaciaire, creusement des vallées d'érosion jusqu'à un niveau très profond.

Une deuxième phase : Affaissement des Alpes, fin de l'époque glaciaire, établissement d'une contrepente dans les vallées d'érosion, apparition des lacs subalpins.

La théorie, parfaitement limpide, ne soulèverait aucune difficulté.

Mais, vient ici l'objection immédiate : l'époque glaciaire n'a pas eu lieu dans les Alpes seulement. Les autres chaînes de l'Europe, les Pyrénées, les monts d'Auvergne, les Vosges, les Alpes scandinaves, l'Ecosse, le nord de l'Amérique ont eu de même leur époque glaciaire. Des montagnes aujourd'hui dépourvues de glaciers en ont été couvertes ; les chaînes où les glaciers sont aujourd'hui très réduits ont connu des glaciers énormes ; les glaciers scandinaves se sont étendus jusque dans les plaines de la Russie et de l'Allemagne du Nord. Dès le moment où l'on a reconnu ces phénomènes identiques ou analogues, dans tant de pays divers, et dans la même période géologique, l'on en a conclu à la simultanéité de l'apparition : K. Schimper a énoncé la notion de la période glaciaire généralisée dans le centre et le nord de l'Europe ; Agassiz l'a développée avec l'enthousiasme qu'il apportait à ses études générales de haute science naturelle ; Charpentier a renoncé à sa théorie de l'extension des glaciers des Alpes causée par le surexhaussement local d'une chaîne de montagnes. Depuis lors, chacun en a cherché l'explication dans des faits de climatologie générale. Il

me paraît cependant qu'il n'est pas absolument déraisonnable de reprendre la première théorie de Charpentier, en la modifiant sensiblement et en l'étendant aux autres pays où l'époque glaciaire a été constatée. C'est ce que je vais essayer d'exposer rapidement.

Si nous considérons la presqu'île scandinave, et si nous étudions la répartition de ses lacs sur le versant oriental, de ses fiords sur le versant occidental, nous y trouverions facilement les mêmes indices que dans les Alpes suisses d'un surexhaussement général du pays, suivi d'un affaissement qui l'aurait ramené à l'état actuel. Nous pourrions probablement aussi bien expliquer le creusement des lacs et des fiords scandinaves, et en même temps l'époque glaciaire scandinave par une surélévation temporaire des Alpes de Norvège ; les mêmes raisonnements que j'applique aux lacs, aux vallées et à l'époque glaciaire des Alpes suisses seraient probablement valables pour la Scandinavie.

La même étude nous amènerait au même résultat pour l'Ecosse et ses glaciers quaternaires, et peut-être aussi pour l'Amérique du Nord et son époque glaciaire. Dans ces contrées, il y a à la fois les faits historiques de la grande extension temporaire des glaciers dans une époque géologique récente, et les faits géographiques actuels d'un riche développement de lacs et de fiords. Si cette coexistence de deux ordres de phénomènes qui semblent liés ensemble avait été constatée uniquement dans ces divers pays, nous n'hésiterions guère à les expliquer comme nous venons de le faire pour les Alpes. (1)

Mais, si nous généralisons, nous arrivons à une notion nouvelle : c'est que dans chacun de ces pays nous aurions la succession identique de deux phases, surexhaussement des montagnes, puis leur affaissement. Cette répétition semblable de phénomènes de même nature, se succédant dans le même ordre, ne serait-elle pas l'indice

(1) Quant aux glaciers beaucoup moins considérables qui ont apparu pendant l'époque quaternaire dans les massifs montagneux des Vosges et de l'Auvergne (et peut-être aussi ceux des Pyrénées), il ne serait pas impossible de les expliquer par un effet du voisinage des grands glaciers des Alpes suisses. L'intense foyer de froid que devaient occasionner les énormes surfaces glacées des Alpes pouvait bien abaisser de quelques degrés le climat général de l'Europe occidentale, et faire descendre la limite des neiges, en dehors même des régions surexhaussées, de telle sorte que des glaciers apparussent dans des montagnes qui aujourd'hui n'en portent plus, ou se développassent considérablement dans des chaînes où ils sont actuellement très réduits.

d'une loi que l'on pourrait formuler ainsi : *Après qu'une chaîne de montagnes a été soulevée par des actions orogéniques, au bout d'un certain temps elle s'affaisse et redescend à des altitudes inférieures.*

C'est ici que je fais intervenir une idée d'une haute portée générale que le professeur A. Heim a énoncée, pour la première fois, à ce que je crois, dans sa conférence sur l'histoire du lac de Zurich. (1) Après avoir exposé la genèse du lac de Zurich, dans un développement qui s'harmonise fort bien avec ce que j'ai déduit pour la genèse du Léman, il continue en ces termes : « Le procès de la formation des lacs comme acte final de la formation des hautes montagnes semble être très général. Une compression horizontale de l'écorce terrestre a amené le plissement des montagnes et leur poussée en hauteur ; mais, en même temps que le plissement se développe, la compression latérale diminue corrélativement. L'excès d'étendue de l'écorce terrestre est absorbé par les plis des montagnes, et à l'exhaussement des montagnes il succède un affaissement de la région montagneuse elle-même et de ses régions avoisinantes, d'où résulte une contrepente dans les vallées d'érosion déjà formées et l'établissement des lacs. » Ces lignes, dans le texte original, sont d'une concision admirable ; (2) autant d'idées que de mots ; j'ai dû déjà les étendre dans ma traduction ; je vais essayer de les développer comme je les comprends, à ma manière, espérant que je ne trahirai pas trop les idées de mon ami de Zurich.

Le globe terrestre, dans son refroidissement progressif, subit une contraction du noyau central ; l'écorce de la terre, déjà refroidie, ne participe pas à cette contraction thermique et, pour suivre le mouvement de retrait des couches sous-jacentes, doit se plisser ; de là la formation des plis des montagnes. Une région autrefois plane, qui se plisse ainsi, a son altitude générale surélevée, et la chaîne des montagnes se

(1) Die Geschichte des Zürichsees. Neujahrsblatt der Zürcher Naturf. Gesellschaft. 1891, p. 9

(2) Voici les termes mêmes de Heim : « Der Vorgang der Seenbildung als periodischer Schlussakt der Hochgebirgsbildung an deren Rande scheint allgemeiner Natur zu sein : horizontale Strauung in der Erdrinde faltete ein Gebirge empor. Mit der Faltung aber wurde die Strauung mehr und mehr ausgelöst. Das Zuviel von Erdrinde ist nun absorbirt in der Faltung, und es folgt auf das Empordrängen ein Nachsinken des ganzen Gebirges und seiner begleitenden Zonen, wodurch die schon ausgebildeten Thalfurchen rückläufiges Gefälle erhalten und zu Seen werden. »

surexhausse au-dessus de la plaine primitive. Mais ce surexhaussement n'est que temporaire. Le noyau central continue à se contracter; il y a tendance à la formation d'un vide qui devra être comblé; pour satisfaire à cette nécessité, l'écorce terrestre, ayant déjà perdu sa rigidité par les plissements de la phase précédente, peut céder et se déprimer; elle s'enfonce en exagérant peut-être ses plis primitifs, mais surtout en diminuant d'altitude. A la phase d'exhaussement, due à l'établissement des plis des montagnes, succède une phase d'affaissement qui comble le vide résultant de la rétraction progressive du noyau central. (1)

Ce raisonnement me paraît fort juste. Je m'en empare pour les théories qui nous occupent, et je dis que toute région montagneuse doit présenter successivement les deux phases d'élévation et d'affaissement : si le phénomène a lieu dans des régions suffisamment froides, si l'exhaussement en porte les sommets au-dessus de la limite des neiges, il y aura développement des glaciers; la phase d'affaissement fera diminuer les glaciers; si l'affaissement ramène les montagnes au-dessous de la limite des neiges, les glaciers disparaîtront. Les conséquences de ces théories sont les suivantes :

1° L'époque glaciaire est un phénomène temporaire dû au soulèvement des montagnes au-dessus de la limite des neiges; sa fin correspond à la phase d'affaissement qui suit nécessairement l'exhaussement primitif.

2° L'époque glaciaire est un phénomène local dû à des causes orogéniques, et non un phénomène général dû à des causes climatologiques. Il peut y avoir coexistence ou succession dans l'époque glaciaire de diverses chaînes de montagnes.

3° La genèse des lacs subalpins a pour cause seconde l'établissement d'une contrepente sur le cours d'une vallée d'érosion lors de la

(1) D'après une nouvelle communication de M. Heim, celui-ci attribue l'affaissement consécutif de la chaîne de montagnes, non, comme je le suppose, à la contraction ultérieure du noyau central de la terre, mais à l'action de la pesanteur. Tant que les pressions latérales agissaient et refoulaient les couches vers l'axe de la région en plissement, elles supportaient le poids des montagnes surexhaussées; mais une fois le plissement effectué, la pression latérale se réduit à si peu de chose qu'elle ne résiste plus à l'action de la pesanteur et que la chaîne des montagnes s'enfonce et s'affaisse. *A. Heim. in litt.*, 1er octobre 1891, et Beiträge zur geolog. Karte der Schweiz XXV, 475 sq. 1891.

phase d'affaissement de la région centrale des montagnes; pour cause première les phénomènes orogéniques du plissement des montagnes et de leur affaissement consécutif.

Supposons que le surexhaussement des Alpes ait coïncidé avec l'apparition de l'époque glaciaire, et que, avec ou sans modifications climatologiques, de causes extrinsèques ou cosmiques, les glaciers se soient développés à mesure que les Alpes se soulevaient, et en raison de ce soulèvement; supposons que ce soit pendant la phase de crue de la grande période multi-séculaire qui a amené l'énorme extension des glaciers que la vallée du Rhône ait été creusée jusqu'aux couches qui forment les murailles du plafond du Léman; supposons que, les Alpes s'affaissant, la poussée des glaciers ait été moins forte et que, par conséquent, l'affaissement des Alpes ait provoqué la phase de décrue des grands glaciers; nous aurons à tirer de ces suppositions et hypothèses les conclusions suivantes :

A. L'époque glaciaire subalpine aurait comme cause principale le surexhaussement des Alpes.

B. Ce serait essentiellement à l'érosion glaciaire que nous aurions à attribuer l'approfondissement extrême de la vallée du Rhône qui l'a fait descendre jusqu'au plafond du Léman. — Erosion glaciaire dans le sens que j'ai exposé plus haut, c'est-à-dire trituration des roches par le glacier, mais toujours en présence et sous l'action de l'eau courante, nécessaire pour enlever la poussière des roches triturées; érosion glaciaire et non excavation; creusement d'une vallée en pente descendante et non d'une cuvette ou d'un bassin; je ne puis assez répéter le point de vue précis auquel j'entends rester.

C. Ce serait au moment du maximum des glaciers qu'aurait commencé l'affaissement des Alpes, affaissement qui aurait eu pour première conséquence la décrue des glaciers et comme seconde conséquence l'établissement de la cuvette du lac. Ce serait donc peu après cette date qu'il faudrait rapporter l'origine effective du Léman, lac Léman d'abord rempli par le culot du grand glacier, à peu près immobile, en état de disparition par fusion, lac Léman qui aurait apparu, sous la forme de nappe liquide, seulement lorsque les glaces auraient été liquéfiées.

D. L'alluvion ancienne de Genève, alluvion frontale du glacier, aurait été déposée avant que le Léman existât comme lac; elle aurait été

un dépôt fait sur le plafond d'une vallée en pente continue depuis les Alpes. (1) Il n'y aurait donc pas lieu, pour l'expliquer, à mettre en jeu les suppositions assez compliquées qui ont été exigées par la nécessité de lui faire traverser le bassin du lac Léman. — Quant aux grands

(1) J'ai souvent entendu énoncer l'idée que les torrents qui s'écoulaient des grands glaciers de l'époque diluvienne devaient avoir un débit énorme, dépassant de beaucoup celui des fleuves actuels, ou bien que, à l'époque de la fonte des grands glaciers, le débit des fleuves qui en sortaient aurait été extraordinairement augmenté. Cette idée me paraît fausse, ou du moins considérablement exagérée.

Tout d'abord un glacier ne donne pas une moyenne annuelle de débit d'eau sensiblement plus forte que la même superficie de terrain non recouvert de glace. Les seules actions en plus que l'on peut invoquer sont une condensation un peu plus forte en neige ou en pluie des vapeurs atmosphériques par le fait du réservoir glacé permanent qui refroidit plus rapidement l'air, puis la condensation directe de la vapeur d'eau sur la glace qui n'est pas à négliger (V. *Ch. Dufour* et *F.-A. Forel*, la condensation de la vapeur aqueuse de l'air au contact de la glace, Bull. S. V. S. N. 621. Lausanne 1871); mais cela ne doit pas représenter des valeurs énormes. Il y a cependant une différence, c'est que ce débit, au lieu d'être disséminé dans tout le cours de l'année, est concentré dans les quelques mois d'été où la chaleur est assez forte pour fondre la glace. Si en plaine la neige couvre le sol pendant trois mois, le fleuve évacuera les condensations aqueuses annuelles pendant neuf mois; si en montagne la fusion de la neige et de la glace n'a lieu que pendant les trois mois d'été, le débit du torrent sera trois fois plus fort; il débitera dans le quart de l'année ce que dans le cas précédent il débitait dans les trois quarts de la même période. De même, à l'époque glaciaire, le Rhône qui s'écoulait à St-Maurice, à Genève, à Bellegarde ou à Lyon avait à peu près le même débit annuel que le fleuve actuel aux mêmes lieux, car il drainait la même superficie de bassin d'alimentation; mais cet écoulement s'opérait en quelques mois d'été au lieu d'être étendu sur la plus grande partie de l'année. De ce fait il y avait exagération de la crue estivale actuelle, mais il n'y avait pas changement absolu de régime.

Quant à la fusion finale des grands glaciers quand dans leur phase de décrue ils se sont liquéfiés en eau, elle n'a pas non plus pu donner lieu à des torrents d'un débit énorme; car cette fusion n'a pas pu se faire bien rapidement; elle a dû être fort lente. La chaleur latente absorbée par la fusion est considérable, et même le soleil le plus chaud n'arrive pas à détruire une grande épaisseur de glace. C'est ce que nous avons fort bien vu dans la grande phase de décrue des glaciers de la fin du XIXe siècle; les morceaux de glacier abandonnés par la poussée générale du fleuve solide dans des coins de vallée où l'apport de nouvelles glaces ne se renouvelle pas, ce que l'on appelle du *glacier mort*, se fondent très lentement (glacier du Rhône, glacier d'Arolla); ces blocs peuvent pendant nombre d'années donner naissance à quelques filets d'eau, mais non à des torrents importants. Pour que cette fusion sur place ait été la source des fleuves puissants que les géologues invoquent trop souvent, il aurait fallu une modification subite du climat, une élévation soudaine de la température, un relèvement brutal ou violent de la limite des neiges, qui ne sont pas dans les choses probables.

Les fleuves de l'époque glaciaire ou post-glaciaire étaient à peu près de mêmes dimensions que les fleuves actuels dans les mêmes régions; la concentration en quelques mois de leur transport annuel pouvait tout au plus les amener à un débit estival double ou triple de celui que nous connaissons, mais non à un débit dix ou cent fois plus fort, comme le voudraient certains auteurs.

gisements, soi disant d'alluvion ancienne, de la Drance et du signal de Bougy, je les tiens pour des dépôts d'alluvion latérale dans des lacs ou étangs soutenus par les flancs du grand glacier : ils sont, eux aussi, de l'alluvion fluvio-glaciaire et non de l'alluvion antéglaciaire.

Cette hypothèse accessoire qui relie l'époque glaciaire au surexhaussement des Alpes par une relation de cause à effet, est-elle justifiable ? Elle paraît, à première vue, assez plausible pour que je me hasarde à la livrer aux méditations de mes collègues les naturalistes. Je n'en fais pas, je le répète encore, une partie intégrante et nécessaire de ma théorie de la Genèse du Léman. Celle-ci se résume, en définitive, dans les termes très simples que voici :

Le Léman est un reste non encore comblé d'une vallée d'érosion creusée par le Rhône du Valais.

La vallée a été poussée jusqu'aux assises qui forment les murailles du plafond du lac par le fait d'un surexhaussement général du massif des Alpes.

Ce surexhaussement peut avoir eu une valeur de 500 à 1000^{m} au-dessus des cotes actuelles d'altitude.

La vallée à pente déclive a été changée en un bassin de lac, avec contrepente du plafond, par un affaissement ultérieur du massif alpin lequel a été ramené aux altitudes modernes.[1]

Le Léman ainsi formé a rempli la vallée du Rhône depuis le milieu du Valais près de Sion jusqu'à Genève ; la nappe du Léman primitif était à la cote 405^{m} à en juger par les terrasses fluvio-lacustres des bords du lac.

La partie valaisanne du Léman a été comblée par l'alluvion du Rhône et des torrents latéraux. A mesure que l'extrémité supérieure

(1) J'ai indiqué Ch. Lyell, comme ayant, il y a longtemps déjà, 1863, cherché dans un affaissement des Alpes l'origine des lacs subalpins. Je dois citer encore ici M. Th. Jamieson qui vers 1865 est arrivé à peu près aux mêmes idées. Il supposait que sous le poids des grandes accumulations de glaces de l'époque glaciaire le pays ainsi surchargé a dû s'affaisser localement pour se relever quand les glaces ont fondu. Il admettait en plus que dans certains cas le relèvement postérieur pouvait ne pas avoir lieu, et qu'alors le pays une fois déformé resterait dans ces altitudes inférieures sans reprendre son élévation primitive. Il appliquait cette dernière supposition au massif des Alpes, et expliquait ainsi les lacs subalpins, ainsi que la formation du l o e s s des plaines du Rhin et du Danube (*Th. Jamieson.* On the causes of the depression and reelevation of the land during the glacial period. Geol. magaz du II, IX 1882.)

du lac s'est avancée dans la vallée, à mesure aussi le plafond de la vallée du Rhône valaisan a été surélevé par des alluvions fluviales de manière à conserver une pente générale de 2 $^{00}/_{00}$ environ.

Ce procès de comblement continue de nos jours.

IV. **La plaine du Rhône.**

Une question nous est souvent posée : De combien s'avance la pointe du Rhône ? Les alluvions du fleuve valaisan ont formé la plaine du Rhône ; les alluvions grossières du fleuve se déposent à son embouchure et font progresser le delta émergé. Quelle est la vitesse de cette progression ?

On suppose que le petit village de Port-Vallais était jadis au bord du lac. Il est aujourd'hui à 2^{km} du golfe du Bouveret, à 2.5^{km} de la pointe du Rhône ; tel serait l'avancement de la terre ferme depuis l'époque romaine, époque à laquelle on reporte la fondation du *Portus Vallesiae ;* en 15 ou 18 siècles, le lac se serait retiré de 2000 mètres, ce qui ferait un peu plus de cent mètres par siècle.

On peut objecter qu'au temps de Fatio de Duillier, (1) vers 1676, soit il y a 210 ans, Port-Vallais était déjà à une demi lieue du lac. Qu'était cette lieue de Fatio ? C'était probablement la lieue géographique, l'ancienne lieue française de 25 au degré, de 4445^{m}. Une demi lieue serait donc 2.2^{km}. La position relative du lac n'aurait pas changé depuis 200 ans. Mais cette mesure est tellement incertaine que l'on ne peut lui attribuer une précision à 150 ou 200^{m} près.

Villeneuve a été bâtie au XIe siècle sur l'emplacement de la ville actuelle ; (2) des chartes authentiques la mentionnent depuis l'année 1005, où elle est nommée *Compendie,* sans interruption jusqu'en 1214 où la Ville neuve de Chillon reçut ses franchises municipales, les plus anciennes connues parmi les franchises des communes vaudoises. Elle fut entourée de murs, et il n'y a aucun doute que c'était la Villeneuve actuelle. Or, Villeneuve est encore au bord du lac ; la terre n'a rien gagné de ce côté.

(1) *J.-C. Fatio de Duillier.* Remarques sur l'histoire nat. des environs du lac de Genève, *in* Spon. Histoire de Genève, II, 453. Genève, 1730.

(2) *Martignier* et *de Crousaz.* Dictionnaire du canton de Vaud. Lausanne 1867, p. 930.

Nous n'avons rien à tirer de l'existence de Noville en l'an 1177. Ce village est situé dans l'intérieur des terres à 1.5km du lac. Le lac venait-il à cette époque baigner la colline basse sur laquelle le village est construit ? c'est possible, ce n'est pas certain. En admettant la chose comme probable, il y aurait eu dans cette région gain de la terre ferme à raison de 200m par siècle, pour autant qu'on peut nommer terre ferme les marécages qui séparent Noville du lac.

Je ne puis rien obtenir d'utile pour cette étude dans l'ancienne cartographie suisse. J'ai profité de la superbe collection historique de l'exposition géographique de Berne, en août 1891, pour passer en revue à ce point de vue tous les anciens documents. Deux cartes, celles Aegidius Tschudi, 1538 et 1560 (Nos 9 et 10 du catalogue) (1) et de Ferdinand Bertelj, 1566, (No 11) font remonter l'origine du lac jusqu'à Massongex, par un long golfe étroit, une espèce d'estuaire ; les cartes de H.-C. Gyger, 1634 (No 17), de J.-J. Scheuchzer, 1712 (No 27), de G. Mercator (No 49*a*) placent l'embouchure du Rhône à la hauteur de Monthey ou de Crebelley. Mais dans ces cartes le dessin du lac est tellement fantaisiste, qu'il est impossible d'attribuer la moindre autorité aux détails qui y sont figurés. Du reste d'autres cartes de la même époque donnent de l'extrémité orientale du lac un dessin presque semblable à celui des cartes actuelles ; l'embouchure du Rhône est à la hauteur du Bouveret, entr'autres dans les cartes du P. Ignazio Danti, 1570 (No 12 du catalogue), de Th. Schœpf, 1577 (Nos 39 et 40), de Chr. Murer, 1582 (No 13), de J. Goulart, 1607 (No 44), de Jos. Plep, 1638 (No 48), de Mercator, (No 49), de H.-C. Gyger, 1657, 1688 (No 21), de Sanson d'Abbeville, 1667 (No 22), de Tassin, 1669 (No 23), d'Albert Zollinger, 1684 (No 59), de H.-L. Muoss, 1698 (No 26), d'Ant. Chopy, 1730 (No 62). L'impression que je tire de cette étude de cartographie historique est que, dans les deux ou trois derniers siècles, l'embouchure du Rhône dans le Léman ne s'est pas déplacée d'une manière sensible ; l'avancement du delta a été certainement très faible.

Voilà tous les documents historiques à ma disposition ; cela n'est pas grand'chose.

Un mètre par an d'accroissement à Port-Vallais, deux mètres par

(1) Pour ne pas m'encombrer de citations, je renvoie simplement aux numéros de l'excellent catalogue de l'exposition rédigé par M. le professeur Dr J. Graf, de Berne, qui restera comme une bibliographie raisonnée et méthodique de la cartographie historique suisse.

an (?) à Noville, accroissement nul à Villeneuve. Les faits historiques nous indiquent un allongement lent, très lent, presque insensible de la plaine du Rhône. ([1])

De la lenteur extrême de cet allongement du delta du Rhône, devons-nous conclure à une durée infiniment prolongée de la période qui s'est écoulée depuis l'origine du Léman primitif? Le Léman primitif, nous supposons qu'il remontait jusqu'à la Morge de Conthey, soit à 55^{km} en amont de la tête du Léman moderne; la progression du delta actuel étant très lente, faut-il admettre que le comblement de ce lac valaisan a nécessité une durée énorme? Je ne le crois pas. L'étude de la carte du lac nous instruira dans cet ordre de spéculation.

La carte du lac nous montre que les cônes d'alluvion sous-lacustre des affluents de brève longueur, des affluents torrentiels qui entrent directement dans le Léman, sont de forte inclinaison et se prolongent peu dans le lac. Donc l'alluvion grossière que ces rivières charrient se dépose sur la grève du delta et s'éboule ensuite sur les flancs du talus. La carte du lac nous montre que le cône d'alluvion sous-lacustre du Rhône, fleuve à long cours, se prolonge très loin dans le lac avec une pente très faible qui s'étend jusqu'à la plaine centrale. Donc le sable et l'alluvion impalpable du Rhône sont entraînés en plein lac et se déposent, non sur la grève, mais dans les grandes profondeurs. En termes plus précis on peut dire que les affluents torrentiels font dans le lac un comblement littoral d'alluvion grossière, que le fleuve alpin fait un colmatage central d'alluvion impalpable.

La différence est très sensible. D'où provient-elle? Le Rhône est un fleuve puissant; en crue d'inondation, il charrie une masse énorme d'eau, avec une grande vitesse. Ne serait-il pas capable de transporter, lui aussi, de l'alluvion grossière comme le font les torrents alpins? Certainement oui. La preuve en est qu'à son embouchure nous trouvons encore des galets assez forts, du volume d'un œuf, du poing,

([1]) Des faits très analogues sont constatés à l'embouchure du Rhin dans le lac de Constance; le village d'Altenrhein sur la rive gauche, ceux de Gaissau, St-Johann-Höchst, Fussach sur la rive droite, sont cités dans un document du IXe siècle. Aujourd'hui Altenrhein est à 100^m dans l'intérieur des terres, Fussach est au bord du lac. *Max Honsell.* Der Bodensee, hydrologische Studie, p. 19. Stuttgart, 1879.

d'une tête d'enfant; c'est de l'alluvion grossière qui ne peut être entraînée en plein lac, qui reste sur la grève; c'est elle qui forme le banc de sable immergé de la bouche du Rhône. Mais cette alluvion grossière est peu abondante; elle ne représente qu'une part minime du transport du fleuve, la grande majorité consiste en alluvion impalpable.

Pourquoi cette rareté de l'alluvion grossière, quand une foule de torrents alpins à gros débit caillouteux se déversent dans le Rhône? pourquoi leurs galets n'arrivent-ils pas jusqu'au Léman? S'accumuleraient-ils à l'embouchure des affluents; resteraient-ils en route? Mais, si cela était, le lit du fleuve s'exhausserait constamment, et toutes les tentatives de correction et d'endiguement n'épargneraient pas à la plaine du Valais des submersions progressives, inévitables. — Les galets amenés dans le Rhône par les torrents alpins sont entraînés par le fleuve; mais ils disparaissent en route. Ils sont usés par leur frottement réciproque les uns contre les autres; ils sont usés par le frottement du sable en suspension dans l'eau; ils s'amenuisent tellement en route qu'après un certain parcours ils sont réduits à l'état de sable et de poussière impalpable. Tout fleuve à cours suffisamment long ne charrie plus que du sable; si, dans son lit, nous trouvons encore des graviers ou des galets, ils proviennent d'affluents latéraux à court trajet, se déversant dans le fleuve à faible distance de là. Les galets et cailloux de l'embouchure du Rhône ne viennent nullement des puissants torrents alpins du haut-Valais; la Massa, la Viège de St-Nicolas, la Borgne, la Dranse, les torrents de l'Illgraben ou de St-Barthélemy n'envoient au Léman les cailloux qu'ils charrient que lorsqu'ils ont été réduits à l'état de poussière impalpable; les galets des bouches du Rhône viennent de la Grande-Eau, peut-être encore de la Viège du val d'Illiez, de la Grionne et de l'Avençon.

Il en résulte que tout le comblement littoral du Rhône, tout ce qui fait avancer le delta du fleuve vient de ces derniers petits affluents latéraux, de faible puissance, de faible transport; que la plus grande partie de l'alluvion charriée par le Rhône produit le colmatage central du lac. De là la raison toute naturelle de la lenteur actuelle de la progression du delta.

De ces faits on peut tirer une loi générale: A mesure qu'un fleuve s'allonge par le développement de son delta, la vitesse de cet allongement se ralentit. La progression du delta est rapide quand il n'est encore que peu éloigné des affluents

torrentiels qui amènent de l'alluvion grossière; la progression diminue de vitesse, finit par s'arrêter presque, lorsque la bouche du fleuve est assez avancée pour qu'il n'y amène plus que de l'alluvion impalpable.

Si ces considérations sont justes, voici comment nous pouvons nous représenter l'histoire ancienne du comblement du lac. Le Léman primitif était un seul lac, étendu du milieu du bas-Valais jusqu'à Genève ; dans cette phase, le Rhône développait son action de colmatage dans un bassin fort allongé, et son delta avançait fort lentement. Par suite du comblement latéral des affluents torrentiels du lac, par la Dranse de Martigny ou par le torrent de St-Barthélemy, le lac a été ensuite coupé en deux : un lac supérieur qui recevait seul le colmatage du Rhône et qui s'est rapidement comblé, et un lac inférieur qui, ne recevant plus que l'alluvion des affluents directs, ne se modifiait que très lentement. Plus tard, nouvelle division du lac par la confluence des deltas de l'Avençon, de la Grionne et de la Viège de Monthey, faisant de nouveau obstacle à la dispersion des alluvions impalpables du Rhône dans la partie occidentale du Léman. Plus bas, intervention du cône torrentiel de la Grande-Eau qui, avec les autres affluents, ses voisins, ont amené la formation de la plaine du Rhône s'étendant jusqu'à Villeneuve et au Bouveret.

C'est donc avec des allures fort irrégulières que le comblement du Léman valaisan a dû s'effectuer ; quoique la même quantité d'alluvion ait été (année moyenne) apportée par le Rhône et ses affluents directs, la progression du delta a dû être fort inégale ; certaines phases ont dû être de grande rapidité, d'autres de grande lenteur. Nous sommes actuellement en présence d'une phase de progression très lente du delta, et c'est surtout par le colmatage des régions profondes que se fait le comblement du Léman.

QUATRIÈME PARTIE

CLIMATOLOGIE

Les rapports d'un lac avec l'air atmosphérique sont nombreux et importants. La température des eaux est régie par celle de l'air, par celle des eaux atmosphériques et par l'état de la nébulosité qui arrête plus ou moins les rayons du soleil. Le régime de la hauteur des eaux est sous la dépendance des chutes d'eau, de l'humidité atmosphérique et de la température aérienne qui retient à l'état de neige ou de glace une partie des eaux de condensation ou qui les fait fondre plus ou moins subitement. Les mouvements mécaniques du lac, les vagues, les seiches, etc., sont causés par les vents et les tempêtes. Les conditions d'habitabilité des rives du lac sont influencées par l'ensemble du climat.

Je trouve plus avantageux de réunir dans un chapitre spécial toutes les questions climatologiques, en condensant les notions que la météorologie a recueillies sur le climat de la vallée du Léman et de son bassin d'alimentation. En laissant de côté celles des questions climatologiques qui n'ont pas d'intérêt direct pour l'étude du lac, comme par exemple : la pression atmosphérique, le magnétisme terrestre, etc., je traiterai successivement :

1° La température de l'air, qui intéresse la température du lac ; c'est le plus puissant des facteurs qui agissent sur celle-ci.

2° La décroissance de la température avec l'altitude dans la région du Léman, qui intéresse le débit des affluents par la fonte des neiges et des glaces sur le bassin d'alimentation.

3° L'humidité absolue et relative, qui intéresse le régime des pluies, qui intéresse aussi les faits d'évaporation et de condensation à la surface du lac.

4° La nébulosité et les brouillards, qui intéressent toutes les actions thermiques ou hygrométriques de l'air sur l'eau.

5° Le régime des pluies sur le lac et le bassin d'alimentation, qui intéresse le débit des affluents.

6° Les vents qui règlent le jeu des vagues.

7° Les orages et les tempêtes qui régissent la production des seiches.

8° Dans un dernier chapitre, enfin, je donnerai les lois principales du temps météorologique dans notre vallée.

Je n'ai pas à faire ici un tableau météorologique complet de la contrée ; je choisirai parmi les riches matériaux à ma disposition ceux qui me paraîtront préciser le mieux les données désirables pour nos études spéciales. Je les étudierai autant que possible dans les deux cycles de périodicité régulière, à savoir le cycle annuel, dû à la révolution de la terre autour du soleil, et le cycle journalier[1] dû à la rotation de la terre sur son axe.

I. Chaleur de l'air.

La température de l'air peut s'étudier à bien des points de vue. Il me suffira, pour le but que j'ai devant moi, de résumer les faits suivants.

Je chercherai d'abord quelles sont les allures de variation annuelle de la température atmosphérique, et pour cela, je m'adresserai aux observations de Genève, dans la belle série de cinquante années, de 1826 à 1875, qui a été parfaitement ordonnée et mise en œuvre par E. Plantamour dans ses études magistrales sur le climat de Genève. [2]

Voici d'abord les moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles de Genève, calculées d'après les moyennes journalières. [3]

(1) L'application usuelle du mot diurne à la période des 24 heures ne me satisfait pas, car ce terme doit être réservé à la phase diurne, en opposition à la phase nocturne. Je préfère donner à la période le nom de période journalière. De cette manière, je parlerai de la période journalière, divisée en phase diurne et phase nocturne, comme la période annuelle est divisée en phase estivale et phase hiémale.

(2) *E. Plantamour* I. Du climat de Genève, 1863. — II. Nouvelles études sur le climat de Genève, Genève 1876.

(3) *E. Plantamour* II, 15 et 23.

Décembre	+ 0.80°					
Janvier	— 0.08	hiver	0.75°			
Février	+ 1.60					
Mars	+ 4.60					
Avril	+ 8.97	printemps	8.92			
Mai	+ 13.20			*Année*	9.34.°	
Juin	+ 16.81					
Juillet	+ 18.81	été	17.85			
Août	+ 17.91					
Septembre	+ 14.66					
Octobre	+ 9.88	automne	9.70			
Novembre	+ 4.55					

Les extrêmes de température moyenne ont lieu :

Le minimum du 9 au 10 janvier	par — 0.32°
Le maximum du 22 au 23 juillet	par + 18.90°
L'écart entre les extrêmes est de	19.22°
La durée de la période de réchauffement est de	194 jours
celle de la période de refroidissement de	171 »

La température moyenne de la journée ne donne pas une idée suffisante du cycle journalier, dont la température varie d'une heure à l'autre dans des proportions importantes. E. Plantamour a calculé, d'après ses 50 années d'observations, la variation horaire moyenne de chaque mois.(1) Je me contente d'en extraire les variations bi-horaires de quatre mois, choisis comme exemples au milieu de chaque saison ; on y verra les allures du phénomène.

	Janvier.	*Avril.*	*Juillet.*	*Octobre.*
0 h. *Minuit.*	— 0.8°	+ 7.2°	+ 16.1°	+ 8.5°
2	— 1.0	5.7	14.6	7.8
4	— 1.2	4.9	13.9	7.2
6	— 1.4	5.7	15.3	7.6
8	— 1.4	8.2	18.5	8.7
10	— 0.1	10.2	20.5	10.9
12 *Midi.*	+ 1.4	11.7	22.1	12.3
14	2.0	12.5	23.0	13.0
16	1.5	12.4	22.9	12.5
18	0.6	11.2	21.7	11.0
20	— 0.0	9.6	19.5	9.9
22	— 0.4	8.3	17.7	9.1

Le maximum de la journée a lieu à 3h de l'après-midi dans les mois d'avril à septembre, à 2h dans les six autres mois ; le minimum a lieu

(1) *E. Plantamour* II, 5 sq.

à 3h du matin en juin, à 4h en avril, mai, juillet, août et septembre, à 5h en mars et octobre, à 6h en février et novembre, à 7h en janvier et décembre.

L'amplitude de la variation journalière moyenne est, d'après ces observations de Genève :

Décembre	2.8°	hiver	3.6°	
Janvier	3,4			
Février	4.7			
Mars	5.6	printemps	7.0	
Avril	7.6			
Mai	7.8			*Année* 6.4°
Juin	8.5	été	8.9	
Juillet	9.1			
Août	9.2			
Septembre	8.2	automne	5.9	
Octobre	5.8			
Novembre	3.6			

C'est au mois de décembre que l'amplitude de la variation journalière est le plus faible, au mois d'août qu'elle est le plus forte.

Les chiffres de moyennes donnent les allures générales de la température, mais ils expriment insuffisamment la température réelle, qui est tantôt plus élevée, tantôt plus basse que ces moyennes. Dans l'impossibilité où je suis de donner le tableau complet des variations possibles, je me contenterai d'en marquer le caractère en tirant des chiffres calculés par E. Plantamour, d'après les observations de 50 années à Genève, les trois séries suivantes : [1]

a pour chaque mois, la moyenne des extrêmes journaliers. C'est ce qui est indiqué sous les titres de maximum et de minimum moyens.

b pour chaque mois, la moyenne des extrêmes absolus, c'est-à-dire la moyenne de la température la plus élevée et de la température la plus basse observées dans chaque mois de chaque année, pendant la période de 50 ans. Ces moyennes sont sous le titre de maximum et minimum absolus.

c enfin les extrêmes des extrêmes : j'ai recherché dans les 50 années

[1] *E. Plantamour* I, 2 ; II, 5 à 84.

les températures extrêmes observées dans chaque mois. Ce sont les maximums et les minimums extrêmes:

	Maximum moyen.	*Minimum moyen.*	*Maximum absolu.*	*Minimum absolu.*	*Maximum extrême.*	*Minimum extrême.*
Décembre	3.6°	— 1.8°	11.9°	— 9.3°	19.7°	— 23.3°
Janvier	3.1	— 3.1	11.1	— 10.7	20.7	— 25.3
Février	5.5	— 2.0	13.3	— 9.1	18.2	— 17.7
Mars	9.2	0.6	17.2	— 5.8	22.5	— 13.2
Avril	14.2	4.2	21.9	— 1.9	26.1	— 5.5
Mai	18.8	8.0	25.8	1.7	30.4	— 2.3
Juin	22.6	11.3	29.7	5.8	32.7	3.1
Juillet	24.8	13.1	31.5	7.7	36.4	3.9
Août	23.8	12.5	30.7	7.2	35.5	3.1
Septembre	20.0	10.0	26.6	4.2	31.1	— 1.9
Octobre	14.3	6.1	21.8	— 0.7	25.8	— 6.6
Novembre	7.9	1.7	15.6	— 4.7	20.0	— 12.5

Les températures extrêmes enregistrées par les thermomètres à index, de 1826 à 1891, ont été :

pour le maximum + 36.4°, le 6 juillet 1870
pour le minimum — 25.3°, le 15 janvier 1838
ce qui donne pour l'amplitude des variations extrêmes 61.7°.

Le nombre moyen des jours de gelée à Genève de 1826 à 1875 est donné par le tableau suivant, qui indique dans sa première colonne les jours où le thermomètre descend au-dessous de zéro, et dans sa seconde colonne celui des jours où il ne remonte pas au-dessus de zéro. (1)

	Jours de gelée.	*Jours de non dégel.*
Octobre	1.6	0
Novembre	9.5	0.6
Décembre	20.7	7.0
Janvier	23.3	9.2
Février	19.1	3.3
Mars	13.0	0.5
Avril	3.2	0
Mai	0.3	0
Année	90.7	20.6

(1) *E. Plantamour* II, 91.

91 jours de gelée, année moyenne ; c'est le quart de l'année. Pendant le quart de l'année, le thermomètre à minimum, observé chaque jour, descend dans notre climat au-dessous de zéro.

Dans la période de 1826 à 1891, notre pays a subi quelques grands hivers remarquables par la durée du froid et par des congélations partielles du lac. Je les caractériserai d'après les observations de Genève.

	Jours de gelée *Minimum négatif.*	Jours de non dégel. *Maximum négatif.*
1829-30	113	52
1849-50	107	29
1853-54	105	30
1856-57	106	18
1857-58	101	17
1879-80	98	56
1890-91 (1)	118	46

La date moyenne à Genève de la première gelée est le 29 octobre. Celle de la dernière gelée, 19 avril (moyennes de 50 années). (2)

Dans les 66 années de 1826 à 1891, la gelée la plus hâtive à Genève a eu lieu le 30 septembre 1843 ; la gelée la plus tardive a eu lieu le 25 mai 1867.

Les chiffres ci-dessus se rapportent à une seule station, celle de Genève, la station de notre vallée dont le climat a été le mieux étudié et sur laquelle nous possédons les données les plus nombreuses. Il serait trop encombrant de publier ici un tableau aussi étendu pour les autres stations dont nous possédons des observations météorologiques moins complètes, mais cependant excellentes.

Mais pour permettre de juger du climat des différentes régions du lac, je me suis adressé à l'obligeance de M. le Directeur R. Billwiller, de l'Institut central de météorologie suisse à Zurich, qui a bien voulu me communiquer le tableau suivant ; il est extrait de sa Climatologie

(1) Dans l'hiver de 1890-1891 nous avons eu à Morges une série de 96 jours de gelée, pendant lesquels chaque nuit le thermomètre est descendu au-dessous de zéro, du 26 novembre 1890 au 1er mars 1891. C'est la plus longue série connue dans nos climats par des observations thermométriques.

(2) *E. Plantamour*, II, 95.

suisse, actuellement sous presse. Dans ce tableau,[1] nous avons les moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles de la température calculées d'après les observations régulières faites :

à Morges, de 1850 à 1854[2], et de 1864 à 1866 par MM. F. Burnier, Ch. Dufour et A. Yersin, le thermomètre étant placé à 7m au-dessus du lac et à 300m dans l'intérieur des terres;

à Lausanne, de 1874 à 1886, par M. Hirzel, directeur de l'Asile des aveugles ; hauteur du thermomètre 138m au-dessus du lac, à 1400m dans l'intérieur des terres ;

à Montreux, de 1864 à 1877, par M. le Dr Carrard, à Vernex (hauteur du thermomètre 4m, distance du lac 12m) et de 1888 à 1890 par M. C. Bührer, à Clarens (hauteur 10m au-dessus du lac, distance 65m) ;

à Aigle, de 1881 à 1890, par M. le Dr Bezencenet; thermomètre à 50m au-dessus du lac, et à 9800m de distance du lac, dans la vallée du Rhône.

Ces valeurs ont été rapportées par M. Billwiller à la moyenne trentenaire de 1851-80 de Genève[3] par une réduction convenable, et sont par conséquent parfaitement comparables.

	Genève.	Morges.	Lausanne.	Montreux.	Aigle.	*Moyennes.*
Décembre	0.6°	0.9°	0.4°	1.6°	0.7°	0.8°
Janvier	0.5	0.5	0.5	1.5	0.9	0.8
Février	1.9	1.8	1.7	2.6	2.5	2.1
Mars	4.6	4.7	4.3	5.1	5.1	4.7
Avril	9.2	9.3	9.4	9.7	9.9	9.5
Mai	12.9	13.1	12.9	13.5	13.5	13.2
Juin	16.7	16.6	16.7	17.1	16.8	16.8
Juillet	19.0	18.7	18.9	19.2	18.9	18.9
Août	18.2	17.9	18.0	18.4	18.2	18.1
Septembre	14.9	14.8	14.8	15.2	15.1	15.0
Octobre	10.1	10.0	10.0	10.7	10.5	10.3
Novembre	4.4	4.4	4.2	5.0	4.8	4.6

(1) Malheureusement il n'existe pas, à ma connaissance du moins, de séries d'observations de température faites sur la côte savoyarde du lac qui puissent être comparées et rapportées aux valeurs de nos stations suisses.

(2) *Ch. Dufour*. Résumé des observations météorologiques faites à Morges de 1850 à 1854. Bull. S. V. S. N. VI, 199, 1860.

(3) Le thermomètre de l'Observatoire de Genève est à 33m au-dessus de la nappe du lac et à 1000m de distance horizontale du port.

	Genève.	Morges.	Lausanne.	Montreux.	Aigle.	*Moyennes.*
Hiver	1.0	1.1	0.9	1.9	1.4	1.2
Printemps	8.9	9.0	8.9	9.4	9.5	9.1
Eté	18.0	17.7	17.9	18.2	18.0	17.9
Automne	9.8	9.7	9.7	10.3	10.1	10.0
Année	9.4	9.4	9.3	10.0	9.7	9.6

De ces chiffres, je tire les comparaisons suivantes :

La moyenne générale est 9.6°.

La moyenne annuelle va en décroissant de Montreux à Aigle, à Genève et Morges, à Lausanne. La plus grande chaleur de Montreux tient évidemment à sa position admirablement abritée contre les vents du nord; celle d'Aigle, à son éloignement du lac et à sa position abritée; l'excès de froid de Lausanne vient de son altitude plus élevée.

La moyenne de l'hiver va en décroissant de Montreux à Aigle, à Morges, à Genève, à Lausanne. La plus grande chaleur relative de Morges vient du réchauffement par voisinage du lac, plus effectif qu'à Lausanne et Genève.

La moyenne du printemps va en décroissant d'Aigle à Montreux, à Morges, à Genève, à Lausanne. La supériorité d'Aigle est due à son éloignement du lac.

La moyenne de l'été va en décroissant de Montreux à Genève et Aigle, à Lausanne, à Morges. Le rafraîchissement par voisinage du lac explique le peu de chaleur de l'été à Morges.

La moyenne de l'automne va en décroissant de Montreux à Aigle, à Genève, à Morges et Lausanne. D'où provient la supériorité de Genève sur Morges et Lausanne ? (1)

(1) M. Billwiller, que j'ai consulté à ce sujet, attribue à l'influence de la grande cité voisine les chiffres plus élevés des observations de Genève, surtout en été et en automne. D'après les études de Hann (Handbuch der Klimatologie, p. 22), la grande agglomération de population dans une cité élève notablement la température locale. C'est ainsi que, entre Vienne et la campagne environnante de la plaine du Danube, il a reconnu les différences suivantes en faveur de la température citadine :

Hiver	+ 0.3°	été	+ 0.9°	année	+ 0.5°
Printemps	+ 0.5	automne	+ 0.5		

II. Diminution de la chaleur atmosphérique dans les hautes altitudes.

Si l'on s'élève dans l'atmosphère, on constate que la température de l'air décroît assez rapidement, c'est-à-dire que les couches inférieures de l'air sont plus chaudes que les couches sus-jacentes. Cela donne une stratification thermique inverse (1) dans laquelle l'état d'équilibre est maintenu, malgré l'instabilité apparente d'une telle superposition, par la compression des couches inférieures de l'air; par cette compression, leur densité est assez augmentée pour compenser et au-delà la dilatation résultant de la température plus élevée. Il en résulte pour les intérêts du lac que, sur les montagnes élevées de son bassin d'alimentation, l'eau atmosphérique tombe plus fréquemment à l'état de neige, et s'accumule en particulier sous cette forme pendant toute la saison froide, que par conséquent les rivières affluentes, venant des régions de haute montagne, sont à l'étiage en hiver, et ne se gonflent que lorsque les chaleurs de l'été font fondre les neiges alpines.

La valeur moyenne de la chute de température atmosphérique, pour nos régions tempérées du centre de l'Europe, est de 0.57° pour 100m d'altitude,(2) soit de 1° pour 175m d'altitude surajoutée.

Tels sont les chiffres moyens, mais ils sont soumis à une variation annuelle très caractérisée. En hiver, la différence de chaleur est moins forte qu'en été, et cela dans les proportions suivantes. La température de l'air s'abaisse de 1° si l'on s'élève :

en hiver,	de 222m
au printemps,	de 149m
en été,	de 143m
en automne,	de 188m.

(1) Il est fort commode, ainsi que nous le verrons plus loin dans l'étude de la thermique du lac, de désigner par les termes de stratification directe les cas où les couches les plus chaudes d'un fluide sont superposées aux couches les plus froides, et stratification inverse les cas où les couches froides reposent sur les couches chaudes. Je n'hésite pas à employer la même terminologie pour la stratification thermique de l'air atmosphérique, malgré l'usage de quelques météorologistes d'appeler inversion de température les cas où la stratification thermique est directe.

(2) *Hann.* Klimatologie, 152. Stuttgart 1883.

Pour notre vallée, j'ai tiré des études d'E. Plantamour sur la température de Genève et du Grand-St-Bernard des valeurs qui montrent un taux un peu plus faible de la décroissance de température. [1] Voici les moyennes annuelles et saisonnières que j'ai calculées d'après ces chiffres, et que je donne sous deux formes : l'ascension nécessaire pour abaisser la température de l'air de 1°, la baisse de température qui correspond à l'ascension de 100m.

	Différence d'altitude pour 1°.	*Différence de température pour 100m.*
pendant l'hiver,	228m	0.44°
» le printemps,	173	0.58
» l'été,	174	0.56
» l'automne,	198	0.51
en moyenne annuelle	194m	0.53°

Ainsi, en hiver, la stratification thermique est moins serrée qu'en été ; l'excès de froid sur les hautes montagnes, comparées à la plaine, est moins grand en hiver qu'en été. Cela est tellement vrai que l'on constate fréquemment, dans la saison froide, qu'il fait plus chaud à la montagne qu'à la plaine ; on y observe ce qu'on appelle l'inversion de la température (ce que j'appelle la stratification thermique directe). C'est le cas généralement quand la plaine est ensevelie sous un voile de brouillard, tandis que les sommets sont brillamment ensoleillés. Nous aurons à tenir compte de ces faits quand nous aborderons le régime des affluents du lac et celui des brouillards de la vallée.

III. **Humidité de l'atmosphère.**

L'air atmosphérique contient toujours une certaine quantité d'eau, soit à l'état de vapeur transparente, soit à l'état de vésicules de brouillards, soit à l'état de gouttelettes d'eau, pluie, soit à l'état de glace, neige ou grêle. J'étudierai d'abord la vapeur d'eau à l'état aériforme, et pour donner une idée de ses allures je m'adresserai, comme je l'ai fait pour la température, aux observations de Genève, élaborées par E. Plantamour dans son *Climat de Genève.*

La quantité d'eau contenue à l'état aériforme dans l'air varie avec

[1] *E. Plantamour.* Résumé des observations thermométriques et barométriques faites à Genève et au Grand-St-Bernard, de 1841 à 1850. Mém. Soc. phys. Genève, XIII, 1, 1851.

la température de l'air et avec son état de saturation. Je donnerai les chiffres de l'Observatoire de Genève, d'après les années 1849 à 1875.

Je présente le tableau de l'humidité absolue de l'air sous deux formes : en exprimant la tension de la vapeur d'eau par le nombre de millimètres de mercure dont l'état d'humidité de l'air élève la colonne barométrique ; (1) puis en traduisant ces chiffres, ce qui sera plus facile à saisir, dans le nombre de grammes de vapeur d'eau que contient un mètre cube de l'air.

	Tension de la vapeur d'eau.	*Grammes de vapeur d'eau par m³ d'air.*
Décembre	4.20mm	4.3gr
Janvier	4.15	4.2
Février	4.31	4.4
Mars	4.70	4.9
Avril	5.96	6.2
Mai	7.86	8.2
Juin	9.76	9.9
Juillet	10.86	11.2
Août	10.66	10.8
Septembre	9.61	9.8
Octobre	7.66	8.0
Novembre	5.34	5.6

L'humidité relative de l'air s'exprime par la fraction de saturation, c'est-à-dire le rapport entre la quantité de vapeur d'eau que contient réellement l'air et celle qu'il contiendrait à la même température s'il était saturé. Elle est en moyenne à Genève (2) (1849-1875) :

Fraction de saturation.

Décembre	0.865	hiver	0.847	*Année* 0,760
Janvier	0.857			
Février	0.819			
Mars	0.754	printemps	0.718	
Avril	0.697			
Mai	0.704			
Juin	0.698	été	0.696	
Juillet	0.679			
Août	0.710			
Septembre	0.670	automne	0.778	
Octobre	0.831			
Novembre	0.833			

(1) *E. Plantamour*, II, 180.
(2) *E. Plantamour*, II, 181.

Comme pour la température de l'air, l'humidité exprimée par les moyennes ne donne pas l'état réel des choses. D'un jour à l'autre, d'une heure à l'autre, l'humidité varie au-dessus et au-dessous de ces moyennes. Dans les jours froids, la quantité absolue de vapeur d'eau est ordinairement plus faible, mais sa quantité relative est plus forte que la moyenne, et vice-versa ; il en est de même dans les heures froides du cycle journalier. C'est ainsi que, au point de vue de la fraction de saturation, l'air est le plus humide entre 4 et 6 heures du matin, et le plus sec entre 2 et 4 heures du soir. Quant à la quantité absolue d'humidité de l'air, ses variations ont des allures plus compliquées : De novembre à janvier il y a un maximum au moment le plus chaud de la journée, un minimum au moment le plus froid. Mais dans les neuf autres mois, il y a un double minimum, l'un à l'heure la plus chaude, l'autre à l'heure la plus froide de la journée ; le double maximum est aux heures intermédiaires.

Pour les détails de ces variations de l'humidité dans le cycle annuel et journalier, je renvoie le lecteur aux mémoires originaux de Plantamour. Je me contente de donner ici les valeurs extrêmes de ces variations. Les extrêmes dans l'état d'humidité de l'air ont été à Genève pendant la même période, (1) 1849-1875 :

Humidité absolue,	maximum	20.34^{mm}	29 août 1853
»	minimum	1.05	15 avril 1875
Humidité relative,	maximum, saturation fréquente.		
»	minimum	0.11	15 avril 1875.

D'une station à l'autre sur les bords du lac, les différences ne sont pas bien considérables. On en jugera par le tableau suivant qui donne l'humidité relative en tant pour cent. Je le dois à l'obligeance de M. R. Billwiller pour les stations de Morges 1850-54 et 1864-66, de Lausanne 1874-86 et de Montreux 1864-77 et 1888-90. Je mets en regard les chiffres de Genève 1849-75.

	Genève	*Morges*	*Lausanne*	*Montreux*
décembre	86	86	89	83
janvier	86	87	90	83
février	82	79	84	79
mars	75	73	76	76
avril	70	71	71	73
mai	70	74	70	73

(1) *E. Plantamour*, II, 190.

	Genève	*Morges*	*Lausanne*	*Montreux*
juin	70	72	71	71
juillet	68	75	70	71
août	71	78	73	76
septembre	67	78	80	81
octobre	83	83	82	83
novembre	83	83	84	82
hiver	85	84	88	82
printemps	72	73	72	71
été	70	75	71	73
automne	78	81	82	72
année	76	78	78	78

L'humidité la plus forte est à Lausanne en hiver et en automne (station élevée), à Morges au printemps et en été (voisinage du lac) ; la plus faible est à Montreux en hiver, au printemps et en automne (régime alpin), à Genève en été (climat continental).

IV. **La vapeur d'eau à l'état vésiculaire.**

Lorsque l'air est sursaturé d'humidité, celle-ci se précipite en vésicules de brouillard. Suivant la hauteur au-dessus du sol de la couche ainsi sursaturée, nous avons ou des nuages qui flottent dans notre ciel, ou des brouillards qui nous entourent de toutes parts. Les nuages intéressent la thermique du lac en formant un voile qui entrave les radiations caloriques, soit l'arrivée dans l'eau de la chaleur solaire, soit le départ dans l'espace de la chaleur du lac. Les brouillards sont en relation intime avec l'état thermique du lac et de l'air et avec l'humidité atmosphérique.

A. *Nuages. Nébulosité.*

On exprime par des chiffres la nébulosité, c'est-à-dire la fraction du ciel voilée par les nuages, 100 signifiant un ciel entièrement couvert. Je donnerai ici en tableau les valeurs moyennes de la nébulosité pour nos stations principales, d'après les notes de M. Billwiller. J'y joins les mêmes valeurs pour Genève d'après les observations de 1847-75, ordonnées par E. Plantamour. (1)

(1) *E. Plantamour*, II, 222.

	Genève	*Morges*	*Lausanne*	*Montreux*	*Aigle.*
janvier	79	76	76	66	53
février	67	65	76	65	56
mars	61	59	64	63	53
avril	58	56	69	53	61
mai	58	60	63	53	58
juin	54	54	65	54	59
juillet	44	45	56	46	54
août	47	53	55	49	51
septembre	49	41	63	46	54
octobre	69	64	73	61	59
novembre	78	74	78	68	56
décembre	83	77	81	70	59
hiver	76	73	78	67	56
printemps	59	58	65	56	57
été	48	51	59	50	55
automne	66	60	71	58	56
année	62	60	68	58	56

Ces chiffres ne sont pas absolument comparables entr'eux, car ils ne se rapportent pas aux mêmes séries d'années ; la nébulosité est un facteur tellement accidentel et local qu'il n'y a pas moyen de corriger les observations exceptionnelles d'une année par la comparaison avec les observations d'une station normale. Enfin l'appréciation de la fraction du ciel couverte par les nuages se faisant au juger, sans appareil ou procédé adjuvant, il entre dans les valeurs de ce facteur une part considérable pour l'équation personnelle de l'observateur. Quoi qu'il en soit, ces réserves faites, on voit que le ciel de notre vallée est plus souvent, et sur une plus grande étendue, voilé de nuages qu'il n'est découvert. Ce n'est que dans les mois de juillet à septembre que nous avons plus de bleu que de gris dans notre firmament ; et encore, cela n'est pas le cas pour toutes les stations. A en juger par Aigle, la vallée du Rhône, dont la nébulosité est remarquablement faible, a presque autant de nuages en été qu'en hiver.

L'on étudie, depuis quelques années, la durée de l'apparition du soleil, quand il n'est pas voilé par les nuages, au moyen du *Sun-autograph* (*Sunshine recorder* de Campbell), appareil qui enregistre automatiquement le nombre d'heures où les rayons de l'astre ont brillé dans la station. Dans la région du Léman, c'est à Lausanne seulement que ces observations sont faites depuis assez longtemps pour donner des moyennes utilisables. Voici la moyenne des six années, 1886 à

1891 ;(1) les valeurs des cinq premières années ont été mesurées à l'Institut central de Zurich, avec un instrument ad hoc, sur les bandes de papier noirci par l'appareil; j'y ai ajouté les valeurs des douze mois de 1891, mesurées au quart d'heure près, à la station de Lausanne. En regard de ces chiffres de la durée réelle de l'insolation dans chaque mois, je donne encore le nombre mensuel d'heures de la phase diurne astronomique, calculée par M. Billwiller pour la latitude 46° 30′ ; puis le nombre mensuel d'heures pendant lesquelles le soleil a été au-dessus de l'horizon de la station et aurait pu agir efficacement sur l'appareil;(2) enfin, dans une dernière colonne, je donne la durée de l'insolation observée en tant pour cent de l'insolation maximale possible à la station de Lausanne.

	Insolation observée à Lausanne.	*Insolation possible.*		*Insolation observée en tant p. cent de l'insolation possible.*
		Calcul astronomique.	*Calcul expérimental.*	
Janvier	70h	281h	261h	0.27
Février	101	290	268	0.38
Mars	138	371	341	0.41
Avril	158	409	376	0.42
Mai	212	467	425	0.50
Juin	217	473	423	0.51
Juillet	254	477	432	0.59
Août	241	438	405	0.59
Septembre	197	375	348	0.57
Octobre	134	340	311	0.43
Novembre	82	283	261	0.31
Décembre	56	268	249	0.23

D'après ces chiffres, qui seront peut-être légèrement corrigés quand nous posséderons de plus longues séries d'observations, nous aurions à Lausanne, dans les mois de mai à septembre, pendant plus de la moitié des heures possibles, apparition d'un soleil assez brillant pour enregistrer son action au *Sunshine recorder ;* dans les autres mois, la proportion de l'apparition de l'astre varierait du 23 au 50 °/₀ du temps possible de son action.

(1) Pour l'année 1886, il manque les observations de janvier.

(2) Cette valeur, qui tient compte à la fois de l'écran formé par les montagnes autour de la station et d'une certaine paresse de l'instrument, a été calculée, d'après les conseils de M. le professeur H. Dufour, en cherchant les jours où le soleil a brillé pendant toute la journée et a déployé son effet maximal; j'ai tracé d'après ces données la courbe annuelle d'activité possible de l'appareil et j'en ai tiré les valeurs mensuelles.

B. *Brouillards.*

Il y a quelques années, mon maître et ami Alphonse Favre, le géologue de Genève, me demanda pourquoi il y a plus de brouillards à Genève qu'à Morges. Je vais essayer de répondre à cette question.

Tout d'abord, prenons une idée de la fréquence et de la répartition des brouillards au niveau du sol. Voici les chiffres de l'Observatoire de Genève (1847-1875), (1) qui donnent en moyenne le nombre de jours où des brouillards ont été constatés. (2)

Décembre	8.2				
Janvier	7.1	hiver	19.1		
Février	3.8				
Mars	1.0				
Avril	0.3	printemps	1.9		
Mai	0.6				
Juin	0.1			*Année*	32.8
Juillet	0.2	été	0.7		
Août	0.4				
Septembre	1.3				
Octobre	5.0	automne	11.1		
Novembre	4.8				

D'après cela, le brouillard peut exister dans tous les mois, mais il est très rare d'avril à août, et n'est fréquent que d'octobre à février.

Parfois le brouillard dure toute la journée à Genève. Voici, d'après les années 1846 à 1861, la fréquence de ce phénomène, soit le nombre moyen des jours où le brouillard a régné toute la journée.

Octobre	1.1		
Novembre	1.3		
Décembre	4.3	*Année*	10.1
Janvier	2.9		
Février	0.5		

La fréquence des brouillards est fort différente aux diverses stations du lac. Ainsi pour les années 1849 à 1855, nous avons eu à Mor-

(1) *E. Plantamour*, II, 229.

(2) John Aitken a montré en 1880 (Proc. of the r. Soc. of Edinburgh, p. 15) que les vésicules du brouillard sont de l'humidité condensée sur des molécules solides ou liquides, sur une poussière ou sur une particule de charbon, d'une fumée. On pourrait se demander si les brouillards de Genève ne seraient pas cette brume qui remplit l'air de toute grande agglomération citadine, riche en cheminées d'usines. Ce n'est pas le cas ; les brouillards dont il s'agit ici ne sont pas localisés dans la ville et sa banlieue ; ils existent dans tout le pays environnant.

ges en moyenne 12.8 jours où le brouillard a été noté, pendant qu'à Genève il y en avait 33.7.

D'après les notes de M. Billwiller, il y aurait année moyenne :

à Montreux (1864-77, 1888-90) 9.7 jours de brouillard, (1)

à Aigle (1881-90) 10.6 »

Il y aurait ainsi trois fois plus de brouillards à Genève qu'à Morges, à Montreux ou à Aigle.

Voici pour les années 1864 et 1865 la proportion des brouillards d'après les observations météorologiques suisses :

	1864	1865
Martigny	12	9
Bex	9	8
Montreux	9	3
Morges	5	5
Genève	13	22

Du reste, l'observation est vulgaire ; tous les bateliers du lac la confirment ; il y a plus de brouillards dans le Petit-lac et à Genève que sur aucune région du Grand-lac. (2)

Où est la règle ? où est l'exception ? Est-ce Genève qui a trop de brouillards, est-ce le Grand-lac qui n'en a pas assez ? Si nous comparons Genève avec d'autres stations de la plaine suisse, Neuchâtel, Soleure, Zurich, etc., nous verrons que Genève a plutôt moins de brouillards que les autres villes situées dans une position analogue, dans une plaine auprès d'un lac. Genève n'ayant pas trop de brouillards, c'est le Grand-lac qui n'en a pas assez.

Pour comprendre la raison de cette immunité relative de la région du Grand-lac, cherchons la cause de ces brouillards. Lorsqu'en hiver l'atmosphère est calme, par le beau temps d'hiver, dans le régime de l'anticyclone, en général le ciel est serein dans toute la région alpine, et sur les cimes du Jura ; il est en revanche voilé par des nuages ou des brouillards sur toute la plaine suisse. Entre les Alpes et le Jura

(1) Jours où une apparition de brouillard a été notée sur les registres d'observation.

(2) Je tiens à n'être pas mal compris et à ne pas m'exposer au reproche d'avoir calomnié notre pays. Il n'y a pas plus de brouillards ou de neiges dans notre vallée que partout ailleurs, les chiffres cités en feraient la preuve. Mais leur distribution est particulière et c'est à élucider les lois de leur répartition que ce paragraphe est consacré.

s'étend une mer de brouillards qui persiste parfois pendant des semaines consécutives.

Un astronome logé dans la lune, qui assisterait chaque année à ce phénomène, l'attribuerait à des sources chaudes ; mais, reconnaissant que l'apparition n'a lieu qu'en hiver, il arriverait à la notion que ces sources chaudes sont de température inférieure à la température atmosphérique estivale. Nous qui sommes sur les lieux, nous complétons cette hypothèse et nous attribuons les brouillards d'hiver de la plaine suisse aux grands lacs, dont la température est relativement élevée, comme nous le verrons, et qui émettent d'abondantes vapeurs dans un air relativement froid. L'atmosphère de la plaine suisse est saturée ou à peu près, dans ses couches inférieures. Dans la région alpine, au contraire, les eaux étant gelées en hiver, il n'y a pas émission extraordinaire de vapeurs et le ciel est ordinairement serein.

Les stations qui dépendent, sous ce rapport, du régime alpin, comme la vallée du Rhône, Montreux, Vevey, jouissent d'après cela en hiver du brillant soleil que leur envient ceux qui, à Morges, voient de dessous le dôme des nuages briller à l'horizon la ligne éclatante de la lumière et du soleil, ou ceux qui, à Genève, sont pendant des jours et des semaines baignés par l'atmosphère froide et humide des brouillards. Mais cela ne nous donne pas encore la raison de la différence de régime entre Morges et Genève. Morges n'est pas dans la région alpine ; elle est, comme Genève, au milieu de la plaine suisse, dans cette région où l'évaporation des lacs augmente l'humidité de l'atmosphère, et par suite détermine la formation des brouillards et des nuages.

C'est à la différence de température qui existe en hiver entre les eaux superficielles du Grand-lac et du Petit-lac que j'attribue la différence de régime au point de vue des brouillards. Comme nous le verrons plus loin, en hiver la surface du Grand-lac reste à 5 ou 6°, la surface du Petit-lac descend à 2° ou 3°. Cette différence de température intervient dans la répartition des brouillards.

Lorsque le temps est absolument calme, qu'aucun vent général ne renouvelle l'air de notre vallée, et même qu'aucune brise locale ne mélange les différentes couches, la couche horizontale de nuages, qui en été plane ordinairement à quelques centaines ou à quelques milliers de mètres de hauteur, s'abaisse en automne et surtout en hiver, et descend même au niveau du sol. La couche inférieure de l'atmosphère est

sur toute la plaine au même degré d'humidité et, puisqu'il y a formation du brouillard, elle est saturée. Mais supposons que sur un district de cette plaine le sol soit accidentellement suréchauffé à une température sensiblement plus élevée que le reste du pays. Au contact de ce sol chaud, l'air se réchauffe, et la même quantité de vapeur, qui par une température plus basse le saturait, ne suffit plus à former le brouillard; entre ce sol suréchauffé et la couche de brouillard il y aura une couche d'air transparent.

J'ai observé un exemple démonstratif de ce phénomène à Lausanne, le 4 juin 1880, à 9h du matin. La ville de Lausanne toute entière était plongée dans un brouillard dense et immobile qui s'élevait au-dessus de nous, à une hauteur inconnue mais probablement considérable. Dans les faubourgs extérieurs, au-dessus et au-dessous de la ville, le brouillard arrivait au niveau du sol, tout au moins arbres et maisons isolées étaient voilés par le nuage. Mais au-dessus de la ville elle-même, le brouillard se relevait à quelque dix mètres au-dessus des toits ; il sem-



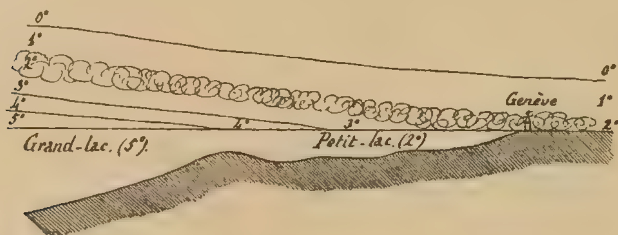
(Fig. 32.) La nappe des brouillards se relevant au-dessus d'une ville.

blait soulevé (fig. 32) ; il était simplement dissous par la chaleur développée par une ville de trente mille habitants. [1]

Il en est de même sur le lac en hiver. La température de la surface de l'eau est notablement plus basse dans le Petit-lac que dans le Grand-lac : il y a souvent deux, trois ou quatre degrés de différence. Il en résulte que la couche d'air inférieure, saturée d'humidité à la température basse qu'elle a sur le Petit-lac, n'est plus saturée au-dessus

[1] C'est une confirmation directe des idées de Hann sur l'action réchauffante d'une grande agglomération citadine (voyez p. 278, note 1).

du Grand-lac où elle est réchauffée par le contact avec des eaux chaudes ; il en résulte que la couche de brouillards qui touche le lac du côté de Genève se relève à 50^m ou 100^m au-dessus du Grand-lac. Le croquis ci-joint (fig. 33) explique bien cette distribution des couches dans la



(Fig. 33.) **La nappe des brouillards sur l'extrémité occidentale du Léman.**

supposition que l'air de la vallée aurait un degré d'humidité tel qu'il soit saturé à + 2.0°. Ce lit de nuages, flottant à 50^m, 100^m ou 200^m au-dessus du lac, explique pourquoi il y a plus de brouillards à Lausanne et sur les collines des bords du lac, qu'à Ouchy et Morges, au niveau même du lac.

Telle est la distribution normale des brouillards de l'hiver dans la région du lac qui appartient à la plaine suisse, depuis Vevey jusqu'à Genève, lorsque le temps est calme. J'estime donc, en réponse à la question d'Alphonse Favre, que la différence de fréquence des brouillards à Genève et Morges tient à la différence de température des eaux superficielles dans le Grand-lac et le Petit-lac

Avant d'aller plus loin, précisons mieux les conditions de l'établissement du brouillard. La production du brouillard est due à un état de sursaturation d'une couche d'air ; cet état peut être amené par deux circonstances.

a Ou bien par le contact d'un air chaud, humide, avec un corps froid. Les couches aériennes voisines de ce corps se refroidissent et l'air non saturé à la température originale devient sursaturé à la température nouvelle ; il y a apparition de brouillard, et cela d'autant plus que les couches d'air sont mélangées par des courants d'intensité modérée. J'ai vu des brouillards, sous forme de fumées légères et rapidement évanouies, se développer, dans ces conditions, en été, sur les glaciers ou sur le cours froid du Rhône du Valais. L'on peut artificiellement

reproduire ces conditions par l'expérience suivante : Remplissez de glace un vase de métal enduit d'une couche d'huile pour empêcher le dépôt de rosée ; suspendez le vase dans un air chaud et humide ; les fumées insaisissables du brouillard ne tarderont pas à apparaître sur ses flancs. Appelons ce type de vapeurs vésiculaires des brouillards d'eau froide.

b Ou bien par le contact d'un air froid avec une nappe d'eau chaude. L'eau réchauffe la couche d'air en rapport avec elle et la charge d'humidité ; la moindre brise survenant mélange cet air chaud et humide avec les couches supérieures encore froides ; l'air inférieur se refroidit par mélange, il y a sursaturation et production de brouillard. C'est à ce type des brouillards d'eau chaude qu'appartiennent les brouillards de la plaine suisse que nous venons de décrire, et généralement tous ceux qui apparaissent sur le Léman.

La persistance de ces brouillards de la plaine suisse est parfois surprenante ; ils durent des journées, des semaines parfois, dans les grands calmes de l'hiver. Comment peut-il y avoir ainsi durée prolongée d'un même nuage dans la même couche ? La question doit se poser, car la situation est paradoxale ; en effet, un état de sursaturation de l'air, permettant le développement des vésicules du brouillard, est presque nécessairement transitoire ; ou bien c'est l'action de réchauffement qui l'emportera et les brouillards se dissiperont, ou bien c'est l'action de refroidissement et le brouillard se précipitera en pluie. Pour qu'il y ait état stable, il faut qu'il y ait renouvellement constant des deux conditions opposées qui se neutralisent. Voici comment je me l'explique dans le cas des brouillards de la plaine suisse qui ne sont jamais accompagnés de pluie. D'une part, le dégagement de vapeur d'eau à la surface des lacs relativement chauds est continu ; la provision d'humidité et de chaleur est toujours suffisante. D'une autre part, la couche inférieure d'air froid qui doit condenser l'humidité de l'air chaud, se renouvelle chaque nuit. En effet, au-dessus de la nappe des brouillards, le ciel est serein, et pendant la nuit il se produit une radiation intense, d'autant plus intense que toute l'humidité de l'air étant condensée dans les couches inférieures, les couches supérieures sont très sèches et n'arrêtent presque plus les rayons thermiques ; au-dessus de la nappe des brouillards, le sol perd donc énormément de chaleur par radiation nocturne et, au contact de ce sol glacé, l'air se refroidit ; cet air lourd descend le long des déclivités des

montagnes et vient s'accumuler dans la plaine. C'est ainsi que, chaque nuit, une nouvelle masse d'air froid vient se mélanger avec l'air réchauffé au contact des lacs chauds, et en condenser l'humidité sous forme de vésicules de brouillard.

C'est à un phénomène du même ordre que se rapporte une apparition assez fréquente sur les bords du Léman. En automne, en hiver, nous voyons descendre vers le lac par les principales vallées qui y débouchent, un courant de brouillards qui s'écoulent lentement de la terre vers l'eau ; je les ai souvent observés dans la vallée de la Venoge où ils forment un voile qui sépare Lausanne de Morges ; ils se développent de même dans la vallée de la Veveyse, du Rhône, de la Drance, de l'Arve. Ces brouillards de la Venoge, nous les voyons arriver jusqu'au lac, s'avancer de quelques centaines de mètres, plus ou moins loin, passer quelquefois devant Morges entraînés par un léger morget (1) jusqu'à un ou deux kilomètres des rives, puis disparaître ; ils s'évanouissent en plein lac. Au contact des eaux chaudes du lac, l'air se réchauffe plus vite qu'il n'augmente sa charge d'humidité ; il élève sa température au-dessus du point de saturation, de là, la disparition du brouillard.

La circulation aérienne qui a lieu dans ce cas implique un écoulement de l'air froid, des hauteurs vers les lieux bas ; si cet écoulement est très puissant, comme cela a lieu dans les cas d'inversion de la température, il peut y avoir un tel excès de la production des brouillards, que l'action réchauffante du lac en est dominée ; alors la couche de brouillards repose sur tout le lac. Le fait est rare, mais il se produit généralement plusieurs fois chaque année.

Il est encore un type de brouillard qui est très bien caractérisé : c'est ce qu'on appelle les *fumées du lac*. Lorsque, par un grand froid de 8 ou 10 degrés au-dessous de zéro, il souffle un air vif, la bise par exemple, ou un fort morget, on voit s'élever au-dessus de l'eau des vapeurs légères, peu étendues, interrompues, déchirées, tourbillonnant pendant quelques instants, puis se dissipant aussitôt. Vues en tranche horizontale, elles représentent une couche de un à deux mètres d'épaisseur ; elles atteignent rarement le pont des bateaux à vapeur. Ce phénomène n'apparait jamais lorsque l'air est calme : il est intimement lié à l'existence du vent.

(1) Brise de terre, voir plus loin.

Les fumées du lac sont dues au mélange d'un air très froid avec l'air qui a été au contact de l'eau et est devenu plus chaud et plus humide ; ce mélange abaisse la température de l'air humide au point de saturation, de là, la production des fumées ; elles appartiennent donc au type des brouillards d'eau chaude. Mais ces très légers brouillards se dissipent bien vite dans l'air sec avec lequel le mélange se continue.

J'ai eu l'occasion de faire, dans ces temps de fumées du lac, une observation intéressante. Mon jardin était alors au bord d'une anse du golfe de Morges, relativement protégée contre la bise ; un jour je voyais en avant les fumées du lac entraînées par un courant assez vif du vent du nord, tandis que dans le coin de lac que j'avais sous les yeux, abrité contre le mélange des airs différemment échauffés, il n'y avait pas ou presque pas production de fumées. Cependant quelques légères vapeurs s'élevaient de temps en temps au-dessus de l'eau, et, chose curieuse, s'élevaient en tourbillons spirales ; ces tourbillons de vapeur disparaissaient à quelques décimètres de hauteur. Y a-t-il dans ce cas, comme cela semble probable, formation de courants ascendants verticaux ? Cette rupture d'équilibre, disséminée sur des points assez rapprochés, au-dessus de la surface horizontale de l'eau, comment s'opère-t-elle ? Je n'ai pas la prétention de le discuter ; je me borne à rapporter le fait que j'ai observé assez souvent pour le donner comme certain.

J'ai assisté à l'apparition de fumées du lac dans des circonstances fort extraordinaires. Le 2 octobre 1888, à 6 heures du matin, nous arrivions en bateau à vapeur dans le port d'Ouchy, et tout l'équipage du navire, aussi bien que moi, nous fûmes surpris par ce phénomène qui se montrait dans une saison où personne de nous n'en avait jamais observé. C'était quelques heures avant le début de la plus forte averse de pluie que l'on ait enregistrée dans l'histoire du Léman ; l'air était évidemment saturé d'humidité, et il se refroidissait rapidement tandis que la surface du lac était encore chaude. Quel était le mécanisme de ce refroidissement ? Je ne l'explique pas.

V. **Régime des pluies.**

L'humidité atmosphérique peut se condenser en gouttes pesantes qui tombent sur le sol sous forme de pluie, de neige, de grésil ou de

grêle. Au point de vue de l'alimentation du lac, nous pouvons réunir ces diverses formes de précipités aqueux et les compter pour leur valeur en eau.

I. J'indiquerai d'abord la répartition et la fréquence des jours de pluie dans l'année, c'est-à-dire des jours dans lesquels il est tombé assez d'eau pour qu'on ait pu la mesurer au pluviomètre. J'en donnerai le tableau d'après les observations des stations de Genève, 1826-75, E. Plantamour, — de Morges, 1849-54, Ch. Dufour, — de Lausanne, Montreux et Aigle d'après les notes de M. Billwiller, pour les années signalées plus haut.

	Genève	Morges	Lausanne	Montreux	Aigle	*Moyennes*
janvier	10.1	9.4	10	8.4	5.4	8.6
février	8.3	8.4	10	8.3	7.6	8.5
mars	9.9	7.4	12	10.4	9.4	9.8
avril	10.5	12.2	13	10.7	11.3	11.5
mai	11.8	15.0	14	11.5	12.2	12.9
juin	10.6	13.0	15	11.9	14.7	13.0
juillet	9.4	12.0	13	11.1	14.8	14.1
août	10.1	14.2	12	11.6	12.1	12.0
septembre	10.4	9.6	11	8.3	11.0	10.1
octobre	11.5	13.8	13	10.6	12.0	12.2
novembre	10.8	10.6	13	10.0	10.0	10.9
décembre	9.1	7.2	15	7.6	9.0	9.6
hiver	27.5	25.0	35	24.3	22.0	26.8
printemps	32.2	34.6	39	32.6	32.9	34.3
été	30.1	39.2	40	34.6	41.6	37.1
automne	32.7	34.0	37	28.9	33.0	33.1
année	122.7	132.8	151	120.4	129.5	131.5

La fréquence de la pluie est, d'après ces observations, [1] la plus grande à Lausanne, la plus faible à Montreux ; dans toutes les stations elle est le plus faible en hiver ; dans toutes, sauf à Genève, elle est le plus forte en été ; à Genève les chutes d'eau sont plus nombreuses au printemps et en automne qu'en été. En moyenne, sur l'ensemble de l'année, il pleut dans notre pays un peu plus d'un jour sur trois.

II. Je donnerai en second lieu la quantité moyenne d'eau, mesurée en

(1) Ajoutons, d'après les indications de M. Billwiller, que les jours de pluie étaient notés d'une manière un peu différente dans les stations qui nous intéressent. A Morges, 1849-54, à Genève et à Lausanne on marquait comme jour de pluie toute journée où une quantité d'eau, si faible fût-elle, avait pu être recueillie au pluviomètre ; tandis qu'à Morges 1864-66, à Aigle et à Montreux on ne comptait, d'après les conventions internationales, que les journées où la chute de pluie dépassait 0.3mm.

millimètres, recueillie par les observations pluviométriques. Pour indiquer les allures du phénomène, je détaillerai le tableau complet des valeurs mensuelles, saisonnières et annuelles, d'après la station de Genève, observations de 1826-75, ordonnées par E. Plantamour. (1)

	mm.		mm.		mm.
décembre	51.1	hiver	136.3	*année*	815.9
janvier	48.7				
février	36.5				
mars	47.2	printemps	183.1		
avril	56.8				
mai	79.1				
juin	75.9	été	227.1		
juillet	70.8				
août	80.4				
septembre	94.2	automne	269.2		
octobre	101.0				
novembre	74.0				

Les plus grandes chutes d'eau ont lieu en automne, puis en été, puis au printemps, puis en hiver. Octobre est le mois qui donne le plus d'eau, février celui qui en donne le moins. Cette variation est assez compliquée. E. Plantamour a reconnu que, aussi bien au point de vue de la fréquence de la pluie que de la quantité des chutes d'eau, il y a dans l'année deux périodes de maximum, phases humides, l'une vers la fin de mai, l'autre fin de septembre, et deux périodes de minimum, phases sèches, l'une vers le milieu de février, et l'autre vers la fin d'août. (2)

La plus grande quantité d'eau tombée en 24 heures à Genève a été dans la période 1826 à 1861 (3)

Dans la nuit du 20 au 21 décembre 1841	176.5mm
le 20 mai 1827	162.4
le 2 septembre 1839	85.4
le 19 octobre 1855	80.9
le 29 mai 1856	80.7

Les deux premiers chiffres sont évidemment exceptionnels et correspondent, le premier à une trombe locale de pluie et de neige, le second à une trombe d'eau ; nous pourrions donc compter que les plus fortes pluies ne dépassent guère 80 à 90mm dans les 24 heures, si nous n'avions pas le fait extraordinaire suivant :

La plus forte chute de pluie connue sur le bassin du Léman est celle du 2 au 3 octobre 1888, qui a commencé à 2 heures de l'après-midi et a duré 24 heures.

(1) *E. Plantamour*, II, 233. (2) *Id.*, II, 243. (3) *Id.*, I, 204.

Voici les hauteurs d'eau recueillies dans les diverses stations à notre disposition :

Côte suisse.		*Côte savoyarde.*	
Montreux	90.5mm	St-Gingolph	121.1mm
Lausanne	151.5	Evian	187.0
Morges	137.8	Douvaine	180.0
Nyon	99.6	Le Biot	234.0
Genève	177.4	Les Gets	98.0
Cossonay	107.0		
Gimel	93.6		
Moyenne	122.8mm	Moyenne	164.0mm

Moyenne générale 143.4mm

Cette énorme chute d'eau, qui représente près du septième de la quantité de pluie tombant normalement en une année dans ces stations, a provoqué, comme nous le verrons, une crue extraordinaire et très intéressante du lac.

III. Puis je donnerai les valeurs saisonnières, exprimées en millimètres, des chutes d'eau dans les diverses stations des bords du Léman. Pour les stations suisses, la source est la même que ci-dessus; pour les stations savoyardes, les moyennes ordonnées par M. V. Raulin sont tirées des comptes-rendus de la commission de météorologie de la Haute-Savoie, publiés à Annecy.

	Période	Nombre d'années	Hiver	Printemps	Eté	Automne	*Année*
Genève	1826-75	50	136	183	227	269	816
Douvaine	1876-90	15	151	242	284	299	977
Morges (1)	1849-90	16	159	202	292	300	954
Evian	1870-89	20	169	253	338	317	1077
Lausanne	1874-86	13	188	240	297	312	1037
Montreux	1864-90	17	211	359	426	326	1322
St-Gingolph	1883-89	7	176	276	369	361	1181
Aigle	1881-90	10	138	234	328	248	948
Moyennes			166	249	320	304	1039
en %			16	24	31	29	100

Sur la région du Léman, il tombe près de deux fois plus d'eau en été qu'en hiver ; les chutes d'eau de l'automne sont notablement plus fortes que celles du printemps, presque égales à celles de l'été.

IV. Enfin, je donnerai la chute d'eau annuelle dans diverses stations du bassin d'alimentation du Léman, calculée d'après les observations

(1) Une comparaison détaillée des 16 années d'observations communes m'a montré qu'en moyenne la chute de pluie est plus forte à Morges qu'à Genève dans tous les mois, sauf au mois d'avril.

météorologiques suisses de 1864 à 1888, soit pendant un laps de 25 années. La base de ce calcul a été les suites de Genève et du Saint-Bernard qui sont complètes pour la série entière. D'après les moyennes de ces deux séries, j'ai interpolé dans les observations de Lausanne les 3 années, et dans celles de Martigny les 4 années, qui faisaient défaut. De ces quatre suites ainsi complétées, j'ai tiré les valeurs moyennes de chaque année ; celles-ci m'ont servi à ramener à la normale les suites d'observations dont je ne possédais qu'un nombre d'années insuffisant. (1) Voici les résultats de ces calculs. (2)

Vallée du Rhône.

	Altitude	Années d'observation	Nombre d'années	Moyenne annuelle brute	Moyenne annuelle corrigée
	m			mm	mm
Reckingen	1349	1873-74, 83-88	8	815	867
Simplon	2008	1864-69	6	857	922
Zermatt	1620	1864-65, 88	3	617	665
Graechen	1632	1867-68, 70, 83-84	5	510	577
Bains de Louëche	1415	1885-88	4	764	719
Sion	540	1874-85, 88	13	629	592
St-Bernard	2478	1864-88	25	1260	1260
Martigny	498	1864-81, 84, 87-88	21	810	843
St-Maurice	417	1886-88	3	850	831
Colombey	405	1886-88	3	821	802
Gryon	1130	1883-88	6	1170	1178
Les Mosses	1809	1888	1	1304	1283
Sépey	1051	1882, 84-88	6	1214	1160
Aigle	425	1882-88	7	888	874

Rive suisse du Léman.

	Altitude	Années d'observation	Nombre d'années	Moyenne annuelle brute	Moyenne annuelle corrigée
	m			mm	mm
Les Avants	978	1888-90	3	1431	1421
Montreux	380	1863-69, 75-77, 84-88	14	1263	1273
Châtel St-Denis	815	1883-88	6	1337	1342
Cully	380	1883-88	6	983	990
Lausanne	556	1864-65, 67-71, 74-88	22	976	976
Cossonay	564	1884-88	5	879	889
Morges	382	1864-66, 84-88	8	970	995
Gimel	730	1883-88	6	990	996
Longirod	900	1886-88	3	1172	1145
Nyon	405	1883-88	6	881	887
Genève	408	1864-88	25	843	843

(1) Pour la station des Avants dont nous n'avons avant 1889 qu'une seule année d'observations, j'ai prolongé la comparaison jusqu'en 1890 en faisant intervenir des corrections convenables; malheureusement la station des Mosses a cessé ses observations en 1889.

(2) Je ne donne pas les décimales de millimètres. Je ne les ai pas négligées dans mes calculs, mais l'incertitude des résultats est telle — pour certaines stations nous ne sommes pas sûrs des centimètres — qu'inscrire ces décimales indiquerait des prétentions à une exactitude que nous sommes loin de posséder.

Rive savoyarde du Léman.

	Altitude	Années d'observation	Nombre d'années	Moyenne annuelle brute	Moyenne annuelle corrigée
	m			mm	mm
St-Gingolph	395	1885, 87-88	3	1179	1164
Evian	380	1870-88	19	1072	1049
Col des Gets	1162	1876-88	13	1474	1374
Le Biot	818	1883-88	6	1200	1208
Douvaine	428	1876-88	13	955	891

Ce tableau nous donne, à la colonne des moyennes annuelles corrigées, des valeurs assez satisfaisantes. Les lois générales sont apparentes. On y voit que dans la plaine suisse et le Bas-Valais la chute d'eau annuelle est de 80 à 100^{cm} ; que la partie occidentale du côté de Genève a des sommes d'eau plus faibles que la partie orientale, dont les condensations vont en augmentant à mesure que l'on s'approche des Alpes ; que les Préalpes vaudoises et savoyardes sont des centres puissants de condensation aqueuse ; que la plaine centrale du Valais est remarquablement sèche et que les chutes d'eau y sont inférieures à 80^{cm} ; que dans les stations de montagne, et spécialement dans les Préalpes les pluies augmentent d'importance, avec l'altitude et s'élèvent à 100, 120 et 130^{cm} ; que cependant dans les montagnes du Valais (Graechen, Zermatt, Louëche), entre les grandes chaînes des Alpes Pennines et Bernoises sur lesquelles l'air se décharge de son excès d'humidité, il n'y a pas augmentation notable des pluies avec l'altitude et que le climat y est relativement très sec. Pour exprimer ces faits, qui sont figurés dans ma carte des pluies, page 304, je réunirai les valeurs du tableau en groupes naturels et j'en tirerai les moyennes.

	Moyennes
Centre du Haut-Valais. Reckingen, Zermatt, Graechen, Louëche, Sion	684^{mm}
Faîte des Alpes pennines. Simplon, St-Bernard	1091
Plaine du Bas-Rhône. Martigny, St-Maurice, Colombey, Aigle	837
Alpes antérieures. Gryon, les Mosses, le Sépey, les Avants, Châtel St-Denis, Col des Gets, le Biot	1280
Plateau vaudois. Cossonay, Gimel, Longirod	1010
Léman, Grand-Lac. Montreux, Cully, Lausanne, Morges, St-Gingolph, Evian	1091
Léman, Petit-Lac. Nyon, Douvaine, Genève	807

Nos moyennes sont calculées sur la base de 25 années d'observations dans les stations principales. Est-ce suffisant? La question mérite

d'être discutée. En météorologie on admet qu'une moyenne de 20 années est satisfaisante et que plus l'on augmente le nombre des observations, plus on s'approche de la vérité. Ce serait exact s'il y avait dans les faits météorologiques, dans la valeur de la pluie, puisque c'est elle qui nous intéresse, un caractère d'irrégularité accidentelle, sans loi ni règle. Mais ce n'est pas le cas. A l'occasion de recherches sur les variations des glaciers des Alpes, [1] j'ai constaté que les chutes de pluie étudiées dans la station de Genève de 1826 à 1875, soit dans une série de 50 ans montrent un caractère évident de variation périodique irrégulière ; qu'en prenant des moyennes convenables on reconnaît des phases de sécheresse et des phases d'humidité fort bien marquées. C. Lang a repris le même sujet et est arrivé au même résultat, d'après un matériel beaucoup plus étendu et se rapportant à un grand nombre de stations. [2] E. Brückner enfin, dans une puissante généralisation, [3] a montré le caractère cyclique de ces variations et l'a rendu évident par une statistique abondante et brillamment élaborée. Si le cycle de Brückner de 35 ans était régulier, il est évident que, pour obtenir une moyenne exacte des pluies, il serait nécessaire de considérer des suites d'années d'une demi-période, soit 17 ans, ou des multiples de cette durée ; que toute suite, dont la durée serait plus grande ou moins grande que ces demi-périodes, donnerait des valeurs fausses en faisant intervenir une prédominance abusive ou de la phase sèche ou de la phase humide. Mais la périodicité est irrégulière et dans chaque cas il y a lieu d'analyser les conditions spéciales.

Dans le cas actuel, quelles sont les conditions de la suite d'années, 1864-88, qui nous a servi de base ? Si je les étudie dans la belle série des 65 années d'observations de Genève, qui servent de norme à la météorologie de notre région, observations dont j'ai, par des moyennes convenables, [4] adouci les variations accidentelles, je constate que

[1] *F.-A. Forel.* Essai sur les variations périodiques des glaciers des Alpes. I, Arch. Genève, VI. 22. 1881.

[2] *C. Lang.* Der seculäre Verlauf der Witterung als Ursache der Gletscherschwankungen. Zeitschrift der österreichischen Gesellschaft für Meteorologie. XX, 443. Wien 1885.

[3] *E. Brückner.* Klimaschwankungen seit 1700. Wien 1890.

[4] Pour adoucir les inégalités accidentelles de la courbe des observations originelles, j'emploie la méthode de compensation suivante : je cherche les moyennes ternaires en prenant pour chaque année la moyenne arithmétique de l'année considérée et de ses deux voisines l'antécédente et la conséquente. Ces séries de moyennes ternaires premières je les traite par le même procédé et j'ob-

nous trouvons les variations générales suivantes dans la valeur des pluies à Genève[1] :

			mm
1864	minimum	par	752
1867	maximum	»	847
1869	minimum	»	741
1872	maximum (¹)	»	828
1874	minimum	»	788
1877	maximum	»	960
1884	minimum	»	780
1888	maximum (?)	»	963

Dans cette suite d'années, nous sommes également loin du maximum(²) de 1841, par 1014^{mm}, et du minimum de 1836, par 673^{mm}. J'ai l'impression que nous sommes très près de la moyenne générale. Cela m'est confirmé par la comparaison entre la moyenne générale de nos 25 années, 843^{mm}, et la moyenne générale de 65 années, 1826-90, qui donne 834^{mm}. L'écart n'est que de 9^{mm}, ce qui est très peu de chose, et je puis admettre que les moyennes de mon tableau général sont fort près de la réalité.

Il serait fort désirable que nous pussions tirer de ces chiffres la valeur moyenne de la chute d'eau sur l'ensemble du bassin d'alimentation du lac, pour la comparer au volume d'eau qui s'écoule par le Rhône à Genève ; mais il n'est pas possible de le faire avec précision. Les stations pluviométriques sont trop inégalement réparties ; nous

tiens les moyennes secondes; les moyennes secondes me servent à obtenir les moyennes troisièmes et ainsi de suite. Les moyennes secondes que j'ai utilisées dans l'étude actuelle représentent donc la valeur de l'année considérée multipliée par 3, celles des années voisines, la 1re antécédente et la 1re conséquente, multipliées par 2, et celles des voisines suivantes, la 2e antécédente et la 2e conséquente, multipliées par 1. La courbe compensée que j'ai tracée avec les valeurs de ces moyennes secondes est assez adoucie pour montrer parfaitement les variations générales.

(¹) Si je fais la même opération sur les chiffres moyens des pluies de Genève, St-Bernard, Martigny et Lausanne, je ne vois plus apparaître le maximum secondaire de 1872 et, par conséquent, le minimum de 1874 disparaît aussi ; en revanche, j'ai un maximum en 1881. Les valeurs extrêmes des moyennes secondes sont dans cette série :

		mm
1866	maximum	953
1870	minimum	835
1877	maximum	1103
1879	minimum	1057
1881	maximum	1100
1884	minimum	990
1886	maximum	1024

(²) Maximum des moyennes secondes ; voir la note 4 de la page précédente.

n'avons pas assez d'observations sur les hautes régions des Alpes du Valais qui doivent être des condensateurs puissants de l'air humide arrivant de la plaine ; les seules stations du St-Bernard et du Simplon ne suffisent pas pour donner des bases suffisantes pour l'appréciation de la chute d'eau sur les Alpes bernoises et valaisannes.

Le chiffre que nous tirons de la somme des moyennes des 30 stations est 1000.1mm. Il est probablement assez éloigné du chiffre réel qui exprimerait la hauteur moyenne de la chute d'eau annuelle sur le bassin d'alimentation du Léman.

Pour arriver à un résultat plus précis, j'ai établi, sur la base des chiffres de mon tableau, une carte des pluies du bassin du Léman que je donne, planche III, [1] à l'échelle du millionième ; après avoir marqué, en chiffres rouges, les valeurs annuelles des pluies de nos stations j'y ai tracé les courbes isohyètes de 10 en 10 centimètres, c'est-à-dire que j'ai divisé le pays en zones où la hauteur annuelle de la chute d'eau diffère de 1 décimètre. Je les ai teintées avec des tons rouges de plus en plus foncés ; la première zone, la plus claire, qui occupe le centre du Valais, a une chute d'eau inférieure à 0.6m ; la dernière zone, la plus foncée, sur le sommet du Jura, a une chute d'eau de plus de 1.5m. Je suis obligé de faire des réserves très accentuées sur l'incertitude de la position de ces courbes ; si dans la plaine suisse, le Jura et les Alpes vaudoises, les stations sont assez serrées pour donner une probabilité suffisante à la carte des pluies, dans la partie montagneuse du Valais au contraire, les stations sont trop disséminées et les conditions pluviométriques sont trop variées pour que nos courbes isohyètes y aient aucune rigueur. Je les ai tracées suivant les probabilités générales, mais dans la nature elles doivent avoir une complication beaucoup plus grande. Ces mêmes réserves sont applicables aux résultats numériques que j'en ai tirés. J'ai planimétré les aires des différentes zones de la carte et je suis arrivé à une moyenne de 909mm pour la chute d'eau annuelle sur l'ensemble du bassin du Léman (Rhône valaisan, affluents directs du lac et lac lui-même) ; j'évalue l'incertitude de ce chiffre à 3 ou 4 centimètres. Une chute d'eau annuelle de 91 ± 4^{cm}, c'est la valeur que nous utiliserons pour nos calculs de l'alimentation du Léman.

(1) Voir plus loin, page 304.

VI. **Vents.**

Nous distinguerons, d'après leur origine et leurs allures, trois classes de vents qui soufflent sur le lac, à savoir :

les brises,
les vents généraux et
les vents d'orage.

1° LES BRISES

Les brises sont des courants d'air locaux qui soufflent en l'absence de vents généraux et qui sont déterminés par des différences de température entre les diverses régions du pays. Ce sont des vents d'intensité faible, montrant souvent une périodicité journalière bien marquée ; ce sont les **vents de beau temps**.

Les brises peuvent avoir une double origine et provenir :

Ou bien des différences de température sur un pays partagé entre l'eau et la terre ferme; ce sont les **brises lacustres**;

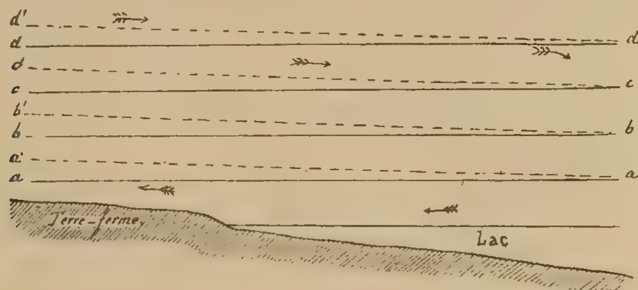
Ou bien des différences de température sur les déclivités d'un pays accidenté; ce sont les **brises de montagne**.

L'une et l'autre forme peuvent intervenir et interviennent sur notre lac, nappe d'eau assez étendue pour agir efficacement sur la température de l'air de la vallée, encaissée d'autre part par des montagnes assez élevées pour que l'action de la déclivité du sol y soit sensible.

Donnons d'abord la théorie moderne des brises en suivant les leçons du professeur J. Hann de Vienne. [1] D'après cet auteur, la dilatation inégale des couches inférieures de l'air, sur des surfaces inégalement chaudes, détermine une inclinaison des plans supérieurs de ces couches; les couches supérieures s'écoulent horizontalement vers la partie déclive, s'accumulent sur la région la plus froide, et y occasionnent un excès de pression qui refoule l'air des couches inférieures. Il y a donc superposition de deux courants, l'un supérieur, primitif, marchant de la région la plus chaude vers la plus froide, l'autre inférieur, secondaire, marchant de la région la plus froide vers la plus chaude. Les brises lacustres auraient donc le mécanisme suivant : Dans la matinée la terre se réchauffe plus vite que l'eau ; il en résulte que l'air se dilate plus

[1] *J. Hann.* Handbuch der Klimatologiè. Stuttgart 1883.

sur la terre que sur le lac ; les couches d'égale pression se soulèvent sur la terre, elles s'inclinent du côté de l'eau. Cette inclinaison des plans cause dans les couches supérieures de l'air un écoulement de l'air vers le lac ; de là, augmentation de la pression sur le lac, diminution de pression sur la terre, et, comme résultat final, courant d'air inférieur marchant de l'eau vers la terre. (1) La fig. 34 exprime graphiquement le phénomène. Les lignes pleines *aa*, *bb*, *cc*, *dd* représentent les couches horizontales de l'air avant la perturbation, les lignes ponc-



(Fig. 34.) Théorie des brises lacustres, brise diurne ; d'après Hann.

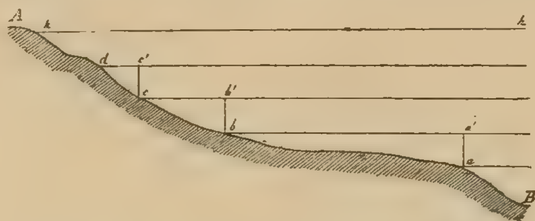
tuées *a'a*, *b'b*, *c'c*, *d'd*, ces mêmes couches après la dilatation de l'air sur la terre ferme ; les flèches indiquent la direction des courants d'air, le courant inférieur est celui que nous observons et que nous allons nommer brise du lac ou rebat. Une répartition inverse rendrait compte de la brise de terre, qui commence à souffler le soir, lorsque le sol se refroidit plus rapidement que le lac. Les plans de séparation des couches s'inclinent vers la terre ferme, l'air supérieur s'écoule dans la même direction ; l'accumulation de l'air sur la terre occasionne un excès de pression et, par suite, un refroidissement de l'air inférieur qui se tourne vers le lac.

Pour qu'il y ait établissement de brises lacustres, il faut donc qu'il y ait échauffement inégal de l'air reposant sur la terre ferme d'une part et sur le lac d'autre part ; ou, autrement, que les actions réchauffantes diurnes et refroidissantes nocturnes agissent avec une intensité inégale sur la terre et sur l'eau. Or, c'est ce qui a lieu : la chaleur solaire diurne échauffe puissamment le sol, la radiation nocturne le refroidit rapidement ; ce sont des faits d'expérience banale qui sont du reste prouvés par l'amplitude considérable de la variation journalière des

(1) *Hann*, loc. cit. p. 106.

couches inférieures de l'atmosphère au-dessus de la terre ferme. Des chiffres cités p. 274, nous constatons que cette variation est en moyenne à Genève de 2.8° en décembre à 9.1° en juillet ; dans les extrêmes journaliers ou accidentels elle est bien plus forte. D'une autre part, nous verrons que la variation journalière de la température superficielle du lac est presque nulle ; qu'elle atteint au plus 1 à 2°, dans des cas exceptionnels, 3 à 4°. Dans la période journalière, le lac représente donc une vaste surface à température relativement constante, la terre ferme une surface enveloppante à température variable, tantôt plus chaude, tantôt moins chaude que le lac ; l'air, en contact avec ces deux surfaces, est donc dans des conditions différentes et il doit en résulter pour lui des différences de température et, par suite, des courants. Il doit se développer des brises lacustres et il y en a en réalité.

D'après la théorie que nous venons d'exposer, les brises lacustres ne sont pas des vents d'appel : elles sont causées par le développement d'un excès de pression sur l'une des deux nappes en présence, ensuite

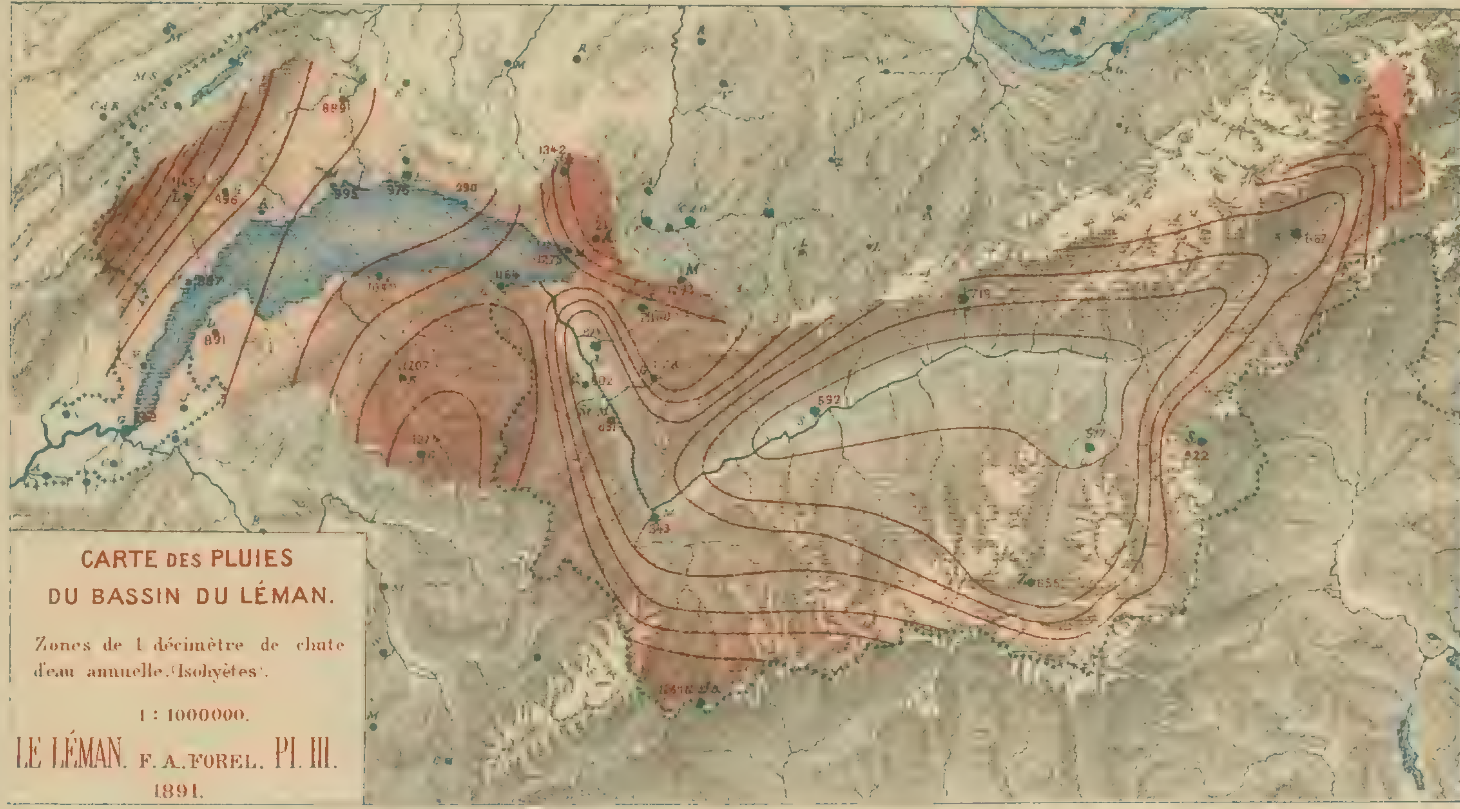


(Fig. 35.) Théorie des brises de montagne ; d'après Hann.

de l'écoulement des couches supérieures de l'air qui se sont inclinées par le fait de dilatations ou de contractions thermiques. Les courants d'air inférieurs qui sont les brises lacustres, sont des vents de refoulement.

Il n'en est pas de même des brises de montagne qui, d'après Hann, [1] auraient le mécanisme suivant : « soit *AB* (fig. 35) une pente de montagne ; le plan *hh* et ses parallèles sont horizontaux. Par une température moyenne et en l'absence de perturbations atmosphériques, la pression est la même sur tous les points de chacun de ces plans. Il n'y a pas de raison pour l'établissement d'un courant d'air. Mais, si dans la matinée le soleil réchauffe toute l'atmosphère de la vallée, cet air se dilate, et il en résulte une altération de l'équilibre qui doit faire monter un vent

(1) *Hann.* loc. cit. p 201.



Wurster Randegger & Cie in Winterthur

le long du flanc de la montagne. En effet, la colonne d'air *aa'* se dilate et la pression s'élève au point *a'*, parce qu'une partie de l'air qui gisait auparavant au-dessous de *a'* s'est soulevée et s'est ajoutée à la pression des couches sus-jacentes; au-dessus du point *b*, qui est dans le même plan horizontal, la pression reste au contraire la même que précédemment. Le même raisonnement s'applique au point *c* par rapport à *b'*, *d*, par rapport à *c'*, etc., c'est-à-dire que dans chaque plan horizontal la pression qui reste constante au contact du sol, s'augmente si l'on s'éloigne du flanc de la montagne. Les plans de même pression ne sont donc plus horizontaux, mais ils s'inclinent contre la montagne; il en résulte un écoulement de l'air de la plaine vers le mont. En même temps le sol du talus se réchauffe; l'air en contact avec ce sol participe au réchauffement, il se dilate et tend à s'échapper en haut. Il y a donc deux forces qui président au mouvement de l'air sur les flancs de la montagne : l'une horizontale l'entraîne vers la montagne, l'autre verticale tend à le faire monter; elles se combinent en une résultante qui fait circuler l'air parallèlement à la déclivité de la montagne en remontant cette pente : pendant le jour la montagne aspire l'air de la vallée. Pendant la nuit le phénomène a lieu en sens inverse et l'air descend des sommets vers la plaine. »

D'après cette théorie, les brises de montagne sont des vents d'aspiration (vents d'appel); elles diffèrent donc essentiellement par leur mécanisme des brises lacustres qui sont, comme nous l'avons vu, des vents de refoulement.

Cette théorie de Hann des brises de montagne me semble un peu compliquée; l'ancienne théorie, plus simple, paraît suffisante. Pendant le jour, les flancs de la montagne sont puissamment réchauffés; l'air en contact avec le sol se surchauffe, devient plus léger, tend à dominer l'effet de la compression qui le maintenait en stratification thermique inverse, tend à s'élever; mais, superposé à un plan incliné, il s'élève obliquement en remontant la déclivité de la montagne jusqu'à ce que, arrivé au sommet, il forme un courant ascendant vertical lequel, amène l'apparition des nuages cumulus. Pendant la nuit, au contraire, le sol perd rapidement de la chaleur par radiation; à son contact avec les flancs de la montagne l'air se refroidit, s'alourdit et s'écoule vers le bas de la vallée par suite de son excès de densité. Si cette explication que j'appellerai classique est juste, la brise diurne, dans les montagnes, serait un vent d'appel, la brise nocturne un vent de refoulement.

Quelle qu'en soit l'interprétation théorique, si les deux classes de brises, brise lacustre et brise montagnarde, diffèrent par leur origine, elles sont semblables par leurs allures et leur direction. Dans les brises de montagne, il y a établissement d'un courant d'air rasant le sol, s'élevant, pendant le jour, du bas vers le haut de la montagne, remontant la vallée, courant d'air descendant le long des talus de la montagne ou de la vallée pendant la nuit. Si, au pied de la montagne, il y a une plaine, qu'elle soit de terre ferme ou d'eau, il y a du fait de la montagne établissement d'une brise diurne remontant contre la montagne, d'une brise nocturne descendant de la montagne sur la plaine.

Le sens et la direction des brises lacustres et des brises de montagne sont donc les mêmes ; là où les conditions le permettent, elles peuvent donc se surajouter.

Les brises de montagne étant dues uniquement à l'inclinaison du sol, leur intensité doit être nulle sur une plaine, et maximale sur un talus d'un certain angle, probablement fort incliné. La terre ferme qui entoure le Léman présente ces dernières conditions dans la région du Haut-lac, sur les flancs de La Vaux et des montagnes de Montreux, sur la côte de Savoie jusqu'à Thonon, peut-être encore sur les flancs de La Côte près de Rolle; il est donc probable que dans ces parties l'effet des brises de montagne peut être dominant. Dans le reste du lac, d'Ouchy et Thonon à Genève, la déclivité de la terre ferme au voisinage du lac est assez faible pour que ce soit l'effet des brises lacustres qui l'emporte. Les deux sortes de brises soufflant dans les mêmes conditions et avec la même direction, il est difficile de les différencier par des caractères spéciaux et de les distinguer d'une manière pratique.

C'est dans ces termes généraux que je crois devoir répondre à la critique que M. le Dr J. Müller a faite de la question dans la séance du 1er mai 1889 de la Société vaudoise des sciences naturelles[1] et qu'il a reprise dans son mémoire sur les vents du nord dans la Suisse occidentale,[2] Il a cru pouvoir nous démontrer, à coups de statistique météorologique, que nous faisions erreur dans l'interprétation des faits de notre lac; il s'est refusé à admettre l'existence de brises lacustres sur les bords du lac Léman, et il n'y a voulu voir que des brises de

(1) Bull. S. V. S. N. XXV, xxi, 1890. Arch. de Genève, XXI, 548, 1889.

(2) Annalen der schweiz. meteorolog. Central-Anstalt, XXV, suppl. 5, année 1888.

montagne. Je reviendrai sur ce sujet quand j'aurai décrit les brises du Léman.

Voici les formes de brises que je connais sur notre lac :

1⁰ **Brises de périodicité journalière.** Dans la période des vingt-quatre heures, nous avons les deux brises classiques des côtes de la mer ou des lacs, la brise de terre et la brise du lac.

I. La brise de terre est connue sous le nom de morget, (1) avec le diminutif de morgeasson lorsqu'elle est faible. Elle est la plus fréquente et la mieux caractérisée, sous forme d'un vent du nord, sur la côte vaudoise entre Ouchy et Rolle et plus spécialement entre St-Sulpice et St-Prex, mieux encore dans le golfe de Morges ; elle est sensible aussi sur d'autres parties du lac, dans la Grande-Conche, où elle souffle du sud, devant la plaine du Rhône où elle vient du sud-est, dans le golfe du Cully où elle descend des monts de La Vaux.

Le morget souffle régulièrement, en temps de calme général de l'atmosphère, depuis 5, 6 ou 7 heures du soir jusqu'à 7, 8 ou 9 heures du matin, ou, mieux dit, depuis le coucher du soleil jusqu'au milieu de la matinée. Son intensité va en décroissant depuis son début jusqu'à sa terminaison. C'est une brise fraîche qui peut aller jusqu'à la formation de moutons.

L'ancienne théorie des brises lacustres voulait que la brise de terre de la période journalière soit causée par une aspiration de l'air sur la nappe du lac, plus chaude que la terre déjà refroidie ; l'air s'élèverait sur l'eau et attirerait, par appel de toutes parts, les couches inférieures ; la perturbation aurait, dans ce cas, lieu sur le lac, et, si cela était vrai, le courant d'air devrait débuter sur le domaine des eaux. La théorie de Hann, que nous avons exposée, cherche au contraire la

(1) Ce nom de morget vient-il de la ville de Morges où ce vent est à son maximum d'intensité ? Vient-il du verbe patois s'emmourger, partir sous voile du port ? S'emmourger vient-il de morget ? Je suis disposé à répondre affirmativement à la première et à la troisième de ces questions, négativement à la seconde — demandant toutefois à être dispensé de justifier ces préférences étymologiques. — Le terme de morget, comme aussi celui de rebat que nous allons rencontrer, sont commodes et plus expressifs que les formules banales de brise de terre ou brise du lac. Témoin le récit du batelier vaudois qui revenait de faire le tour du monde : « On était par le travers du Rio de la Plata ; on sortait du port de Buénos-Ayres ; il soufflait un joli petit morget..... »

perturbation atmosphérique dans le transport des couches supérieures de l'air, du lac vers la terre, en suite de la contraction, par refroidissement, des couches reposant sur le sol. Si ces dernières vues sont exactes, le courant d'air inférieur serait un vent de refoulement, causé par l'accumulation de l'air sur la terre ferme, et la brise devrait débuter sur la terre. Le lieu de l'origine de la brise de terre est donc intéressant à constater, car il permettra de juger entre les deux théories. Or le début du morget a toujours lieu sur la terre ferme et il se propage de proche en proche sur le lac; je l'ai cent fois constaté dans le golfe de Morges, les premières rides apparaissent subitement, par bouffées, le long du rivage, et s'étendent progressivement en avant. Le morget est donc un vent de refoulement et non un vent d'appel C'est là un argument décisif en faveur des idées de Hann.

II. La brise du lac, qui alterne dans la période journalière avec le morget, porte, sur le lac Léman, le nom de rebat. Il souffle pendant le jour, de 10 à 4 heures, avec une intensité plus faible encore que celle du morget; on ne le voit presque jamais moutonner.

Le rebat débute en plein lac et se propage centrifugalement vers la rive. On voit parfois, vers les 9 ou 10 heures du matin, le morget régner encore le long du littoral et les premières bouffées du rebat se dessiner déjà en avant. Par le même raisonnement que nous avons fait à propos du morget, nous en conclurons que le rebat est, lui aussi, un vent de refoulement, et que son origine doit être cherchée dans l'accumulation de l'air en plein lac, par le fait d'un courant supérieur venant de la terre.

Nous venons de dire que les brises de période journalière, le morget et le rebat, tels qu'ils soufflent dans le golfe de Morges, sont, d'après le lieu de leur début, des vents de refoulement. Cela me permet de répondre à la critique de M. J. Müller qui ne veut y voir que des brises de montagne. D'après la théorie de Hann, que M. Müller accepte, les brises de montagne sont des vents d'appel, les brises lacustres des vents de refoulement. Les brises du golfe de Morges, qui sont des vents de refoulement, sont donc essentiellement des brises lacustres. Si, pour les brises de montagne, nous admettons la théorie classique, telle que je l'ai exposée, la brise montagnarde diurne est un vent d'appel, la brise nocturne un vent de refoulement; le lieu de départ de ces brises doit donc être, dans les deux cas, dans la partie supérieure

ou moyenne de la vallée. Par conséquent le lieu de début de la brise nocturne ne peut nous servir à différencier la brise lacustre de la brise montagnarde ; dans l'une et l'autre le départ a lieu sur terre ferme. Mais pour la brise diurne le point de début est décisif ; le rebat commençant en plein lac et se rapprochant de la côte ne peut être un vent d'appel, ne peut être une brise de montagne ; c'est une brise lacustre. Cette nature de brise lacustre, vraie pour le rebat, doit être vraie aussi pour le morget qui est l'opposé du rebat dans la période journalière. J'en conclus que les objections de M. J. Müller ne sont pas fondées et que nous avons bien réellement des brises lacustres sur les bords du Léman.

Serons-nous aussi intransigeant que notre honorable contradicteur, et dénierons-nous tout caractère de brises de montagne aux vents locaux qui soufflent sur le lac dans certaines régions du Léman. Nous en aurons garde. Il est fort probable que, sur les flancs inclinés des côtes abruptes du Haut-lac, la brise de montagne s'additionne à l'effet des brises lacustres ; que les deux causes se superposent et que le lac, d'une part, dans son opposition thermique à la terre ferme, la déclivité de la montagne d'autre part, interviennent chacun pour son compte dans la production de ces courants d'air alternatifs qui, pendant la nuit, descendent vers le lac, pendant le jour remontent vers les hauteurs. Pour différencier ces deux actions, il faudrait étudier à fond le caractère des brises dans chaque golfe du lac, dans chaque vallon débouchant sur le lac, ce qui serait certainement intéressant, mais nous entraînerait à des développements hors de proportion avec le plan général de notre livre ; du reste les matériaux d'observation nous manqueraient dans plus d'une région.

Je veux seulement indiquer ici une observation que je tiens de M. A. Koch, de Morges, lequel connaît mieux que personne le régime du Jura dans les environs de Nyon. Sur les flancs de la montagne la brise descendante du soir, qui y porte le nom de *joran*, a une telle intensité « qu'elle empêcherait de charger un char de foin ». C'est déjà là une force très supérieure à celle de nos brises lacustres du golfe de Morges. Mais, en outre, ce joran si énergique ne s'étend que peu au-delà du pied de la montagne, ne dépasse guère Gingins, Chéserex, Trélex ; il n'arrive pas jusqu'au lac. Si donc sur les bords du lac il souffle le soir un morget, ce n'est pas une brise de montagne venant du Jura, c'est une brise lacustre développée localement sur le plateau inférieur, dans le voisinage du lac.

2° **Brises à direction continue; brises non périodiques.** Outre ces brises de périodicité journalière, j'ai à citer d'autres vents locaux, sans alternance régulière, qui, en certaines saisons, forment un courant d'air continu, soufflant constamment à la surface du sol, de la terre vers le lac. C'est ce que j'ai appelé morget d'automne et morget de neige. (1)

Lorsqu'en automne la température de l'air se refroidit progressivement, le lac garde pendant longtemps une réserve de chaleur qui maintient sa surface à un degré plus élevé que l'atmosphère ambiante; sur la nappe du lac l'air se réchauffe comparativement à la température qu'il a sur la terre ferme. Il en résulte que, en l'absence de vents généraux, il s'établit des courants ascendants sur le centre du lac, un appel qui attire l'air de toutes parts, et qui détermine, dans les couches inférieures, des courants horizontaux convergeant vers le lac. La différence de température entre la terre et l'eau persistant dans le même sens jour et nuit, il n'y a pas arrêt ni inversion dans cette circulation de l'air, et la brise de terre souffle continuellement vers le lac, aussi longtemps que la terre ne se réchauffe pas ou qu'une perturbation générale ne trouble pas l'équilibre de l'atmosphère dans la vallée. Pendant l'automne, pendant l'hiver, le morget souffle presque constamment, comme nous ne le savons que trop à Morges.

Le même phénomène a lieu avec plus d'intensité encore en hiver, lorsque le sol est couvert de neige; alors la terre ferme est à la température de glace ou au-dessous; la nappe du lac restant à + 5° environ, la différence est assez sensible pour provoquer une circulation continue de l'air qui, dans les couches inférieures, marche de la terre vers le lac.

Nous n'avons jamais eu l'occasion de constater dans les couches supérieures le courant de retour, en sens inverse, ramenant l'air de dessus le lac vers la terre; mais il est probable, pour ne pas dire certain.

La cause de la perturbation étant l'excès de chaleur des eaux du lac, et le vent se dirigeant vers ce foyer d'appel, le morget d'automne et le morget de neige sont des vents d'aspiration, et ont par conséquent un mécanisme tout différent du morget nocturne de la périodicité journalière qui est un vent de refoulement.

(1) *F.-A. Forel.* Notice sur les brises du lac Léman. Bull. S. V. S. N., X. 668, 1870.

2° LES VENTS GÉNÉRAUX

En opposition aux brises, qui sont des courants d'air locaux et déplacent simplement quelques masses ou couches atmosphériques dans le cadre restreint de la vallée, les *vents généraux* sont des mouvements beaucoup plus étendus qui transportent l'air d'un pays à l'autre, qui le font passer d'un bassin hydrographique ou orographique dans un autre ; dans notre pays, ils nous amènent l'air qui hier était sur l'Allemagne et qui demain sera l'air de France, d'Italie ou d'Autriche. Le voyage de l'air dans les brises peut se mesurer par kilomètres ; dans les vents généraux c'est par centaines, par milliers de kilomètres qu'il doit se compter.

Les vents généraux, dont la cause était, il y a cinquante ans, un problème insoluble, sont actuellement fort bien expliqués par les fécondes découvertes qu'a amenées l'application de la méthode graphique à la recherche de l'état de l'atmosphère (Le Verrier 1858). Depuis que l'on a appris à tracer sur des cartes synoptiques l'état quotidien de la pression barométrique et la direction des vents, l'on a reconnu que, en particulier dans nos latitudes moyennes, tout le régime de l'atmosphère est gouverné par des mouvements tourbillonnants spéciaux, les *cyclones* et les *anticyclones*. Les uns et les autres sont essentiellement caractérisés par les allures de la pression atmosphérique qui présente un minimum au centre du cyclone, un maximum au centre de l'anticyclone, et par la direction des vents qui, pour les couches inférieures, marchent en spirales convergentes dans les cyclones, en spirales divergentes dans les anticyclones. Ces tourbillons, dont les diamètres sont de 5, de 10, de 15 degrés du globe terrestre, soit de 500, de 1000, de 1500 kilomètres, se déplacent à la surface de la terre en suivant, en général, une ligne oblique de l'équateur au pôle et de l'ouest à l'est ; ils traversent l'Europe du S.-W. au N.-E., leur centre marchant avec une vitesse moyenne de 25^{km} à l'heure ou 600^{km} à la journée. Il y a cependant une certaine irrégularité soit dans la direction de leur trajectoire, soit dans la vitesse de leur progression. Mais en revanche un caractère de constance absolue est le sens de la rotation de l'air : il n'y a pas d'exemple connu d'exception à cette loi : [1]

[1] Nous parlons toujours des latitudes moyennes : dans le voisinage de l'équateur les faits sont plus compliqués.

Dans l'hémisphère septentrional, les cyclones ont un mouvement de rotation de droite à gauche pour un spectateur placé au centre du tourbillon, ou, si l'on veut, un mouvement inverse à la marche des aiguilles d'une montre. La rotation des anticyclones, pour autant que le mouvement giratoire est évident, est en sens inverse de celle des cyclones. La rotation des cyclones et anticyclones de l'hémisphère austral est inverse de ceux de l'hémisphère boréal.

Encore un fait général. Il semble que le cyclone est le phénomène important, primaire, déterminant; l'anticyclone, le phénomène accessoire. Le premier est bien limité, bien dessiné dans sa forme; les isobares y sont nettement concentriques; le second est rarement régulier dans sa forme et son développement. Il semble que l'anticyclone n'est le plus souvent que l'espace laissé libre entre deux ou plusieurs cyclones voisins.

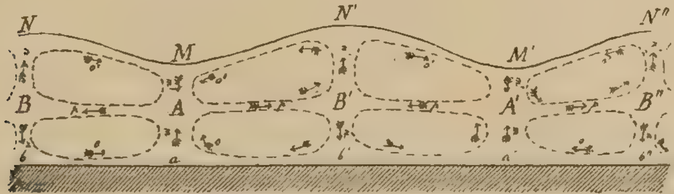
Ce sont ces mouvements tourbillonnants de l'atmosphère qui dominent et occasionnent le régime accidentel du temps; les vents généraux sont, dans nos contrées, uniquement sous leur dépendance. Il n'est pas de notre compétence de faire la théorie de ces grands phénomènes atmosphériques; c'est l'affaire des Hann, des Ferrel, des Bezold. Mais, vu leur grande importance pour la climatologie locale, tout naturaliste est entraîné à chercher à les comprendre, et, sinon à les expliquer, tout au moins à se rendre compte de leurs allures. Voici comment j'essaie de me représenter leur développement dans l'aérosphère de notre globe. [1]

Admettons que, dans les couches moyennes de l'atmosphère, il règne plus ou moins constamment un courant entraînant l'air de l'équateur vers le pôle, et de l'ouest vers l'est, soit, pour notre Europe, dans la direction du sud-ouest vers le nord-est; que dans ce courant les veines fluides soient de vitesse inégale, décroissant de rapidité de droite à gauche sur la même section transversale du fleuve aérien. Dans un tel courant, par suite de la différence de vitesse des veines, il se développera des tourbillons verticaux tournant de droite à gauche, et ces tourbillons se déplaceront à peu près dans le même sens et avec la même vitesse que le courant. Par le fait de la rotation, la force centrifuge chassera l'air du centre à la périphérie du tourbillon, — appe-

(1) S. V. S. N., 15 juin 1881. Bull. XVII, p. LXII, 1881.

lons-le un cyclone — et dans l'axe du cyclone il y aura un vide relatif qui se traduira sur l'ensemble de l'atmosphère par une dépression de la surface aérienne sur l'axe du cyclone, et par un bombement de cette surface en dehors du cyclone.

Soient, fig. 34, *A* et *A*' deux centres de cyclones ; la surface supérieure de l'atmosphère présenterait, pour un observateur placé dans la lune, deux creux en *M* et *M*', tandis que, autour des cyclones, en *N*, *N*', *N*'', les anticyclones montreraient un relèvement de l'enve-



(Fig. 34.) Théorie des cyclones et anti-cyclones.

loppe gazeuse. L'épaisseur de l'atmosphère étant ainsi différenciée, la pression à la surface de la terre deviendra inégale; elle sera plus faible en *a* et *a*' sous les cyclones, plus forte en *b*, *b*', *b*'' sous les anticyclones.

Mais le vide relatif en *A* et *A*' causé par la chasse excentrique de l'air suivant les flèches *p* demandera à être comblé, et pour cela l'air affluera, non horizontalement de la périphérie où il aurait à lutter contre la force centrifuge, mais verticalement des couches supérieures et inférieures, dans l'axe du cyclone. L'air se dirigera en *A* et *A*' en suivant les flèches *m* et *m*'. Mais, pour satisfaire à cet appel d'air, il devra se développer des courants convergents vers le cyclone, soit dans les couches inférieures *o*, soit dans les couches supérieures *o*' ; ce sera l'air accumulé entre *B* et *B*' qui reviendra par un cycle de circulation locale et se dirigera de l'anticyclone vers le cyclone, après avoir marché primitivement du cyclone vers l'anticyclone dans les couches moyennes. Cette circulation, dont la direction est marquée sur la figure 34 par des flèches et des lignes ponctuées, durera aussi longtemps que le tourbillon de l'air. Mais cette révolution, au lieu d'être simplement de direction rayonnante autour des centres, sera entraînée en mouvement de rotation par l'action dominante des tourbillons qui tournoient dans les couches moyennes, et nous aurons en définitive comme résultat :

Dans les couches moyennes de l'atmosphère, tourbillons à spires

divergentes autour du cyclone, à spires convergentes autour de l'anticyclone ;

dans les couches supérieures et inférieures de l'atmosphère, tourbillons à spires convergentes vers le centre du cyclone, à spires divergentes loin du centre de l'anticyclone.

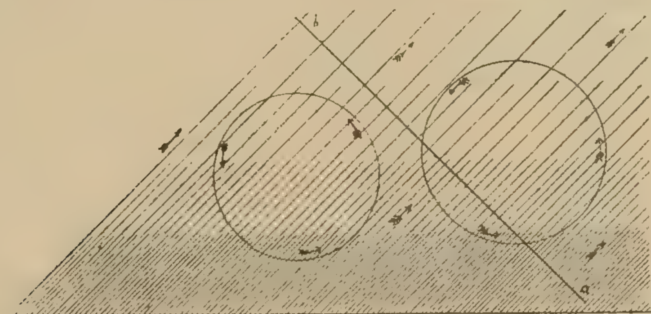
L'observation ne nous apprend rien sur ce qui se passe dans les couches supérieures de l'atmosphère, à la limite extérieure de l'enveloppe aérienne ; mais tout ce que nous connaissons des couches moyennes (région des cirrus) et des couches inférieures de l'aérosphère nous montre des faits conformes à ces indications.

Tout le mécanisme des cyclones et anticyclones, aussi bien ce qui se rapporte à la pression barométrique qu'à la direction des vents et aussi à la prédominance évidente des cyclones sur les anticyclones, s'expliquerait donc s'il existait un courant général de l'atmosphère, se dirigeant obliquement de l'équateur aux pôles et décroissant d'intensité du bord équatorial au bord polaire du courant ; pour l'hémisphère nord un courant marchant du S.-W au N.-E., et décroissant d'intensité dans sa section transversale du S.-E au N.-W. Or c'est, à ce qu'il me paraît, le cas pour l'alizé supérieur ; développé dans la région des tropiques par l'échauffement exagéré des couches inférieures de l'atmosphère, il s'élève en vent ascendant qui se transforme bientôt en vent horizontal divergeant dans la direction des pôles. Les couches où il règne sont ce que nous avons appelé les couches moyennes de l'atmosphère; sa direction originairement purement méridienne se dévie sous l'influence de la rotation de la terre et devient oblique dans la direction de l'orient. C'est bien un courant du S.-W. vers le N.-E. dans l'hémisphère nord. Quant à la décroissance de rapidité des veines aériennes, du côté équatorial au côté polaire du courant, du S.-E. vers le N.-W. dans notre hémisphère, elle résulte, si je ne me trompe, de la décroissance d'intensité du vent à mesure qu'il s'éloigne de son point d'origine. C'est dans les régions équatoriales que le mouvement est engendré, l'air refoulé par l'ascension du courant vertical chaud se répand en nappe dans la direction des pôles ; plus on s'éloigne du lieu d'origine, plus la vitesse du courant doit s'affaiblir. Mais si le courant est oblique aux méridiens, une ligne perpendiculaire à ce courant doit traverser successivement, à mesure qu'elle s'éloigne de l'équateur, des veines à vitesse décroissante. C'est ce qui sera élucidé par le croquis ci-joint (fig. 35), dans lequel j'ai in-

diqué l'intensité du courant par le nombre de hachures : le courant est plus intense près de l'équateur, donc en passant de *a* à *b* nous traverserons des veines de rapidité décroissante.

Il y a là, semble-t-il, tous les éléments nécessaires au développement des tourbillons tournant de droite à gauche, que nous admettons comme étant les origines du système des cyclones et anticyclones de notre atmosphère européenne.

Si l'on m'objecte que l'alizé superieur est localisé dans les régions tropicales et subtropicales, et ne dépasse guère le 30e parallèle, je répondrai que les mouvements tourbillonnants, engendrés dans un fluide par différence de vitesse des veines du courant se déplacent en



(Fig. 35.) Décroissance de vitesse d'un bord à l'autre d'un courant oblique d'intensité décroissante.

traversant des couches en repos et continuent à se propager et à tournoyer jusqu'à de grandes distances. Le coup de rame, qui remue l'eau sur un espace limité, manifeste pendant longtemps et fort loin son action par les tourbillons verticaux du liquide. Les cyclones développés dans les régions tropicales où règne l'alizé supérieur doivent, si je comprends bien le phénomène, une fois lancés dans l'atmosphère, se continuer dans les couches relativement calmes des régions tempérées.

Quoi qu'il en soit de ces essais d'hypothèse, ou plutôt de ces rêveries, sur lesquelles je me garde bien d'insister, le fait est incontestable de l'existence, dans les couches inférieures de l'atmosphère, de tourbillons aériens à rotation de droite à gauche, plus ou moins spirale centripète, autour des lieux de faible pression barométrique, les cyclones ; autour des anticyclones, ou lieux de forte pression barométrique, le tourbillon est moins évident ; s'il est apparent, la rotation va de gauche à droite, en spirales centrifuges. Ces courants d'air, d'étendue

et d'intensité souvent considérables, agitent l'atmosphère et font circuler les masses aériennes d'un pays dans l'autre; ils sont ce que nous appelons les **vents généraux**.

Par le fait de la rotation de la terre qui entraîne l'atmosphère de l'occident à l'orient, tout vent qui s'éloigne de l'équateur est dévié vers l'est, tout vent qui s'en approche est dévié vers l'ouest. Il en résulte que la forme circulaire du tourbillon cyclone se transforme en une forme ovalaire dont le grand axe est dirigé dans l'azimut du S.-W.—N.-E.; que dans la rotation autour du cyclone les vents du N.-E. et du S.-W. sont renforcés et deviennent prédominants, les vents du S.-E. et du N.-W. sont de moindre importance.

Les cyclones se déplaçant dans le sens du S.-W. au N.-E., la vitesse de translation s'additionne avec la vitesse de rotation de l'air ou s'en soustrait, suivant le quadrant considéré. Il en résulte que les vents du S.-W., où les deux vitesses s'additionnent, sont d'intensité prédominante, que les vents du N.-E., où elles se soustraient, doivent être de ce fait d'intensité diminuée. Autour des cyclones, pour employer la terminologie des marins, le quadrant S.-E. est le **côté dangereux**, le quadrant N.-W. est le **côté maniable**.

Quant aux caractères des vents, ils sont régis essentiellement par trois facteurs : le transport de l'air d'un pays plus chaud ou d'un pays moins chaud, le transport de l'air d'altitudes plus élevées ou moins élevées, le transport de l'air de pays plus humides ou moins humides.

Le premier de ces facteurs agit à peu près de la même manière quelle que soit la position de la station considérée : les vents du nord amènent de l'air venant de pays plus froids, ils sont plus froids; les vents du sud sont plus chauds. Malgré la rotation qui fait tourbillonner l'air autour de l'axe du cyclone, il est évident que le séjour, même temporaire de l'air, dans un pays plus septentrional, a abaissé sa température, dans un pays plus méridional l'a réchauffé.

Les deux autres facteurs agissent différemment suivant les localités; ils donnent aux divers vents des caractères spéciaux suivant la position géographique et suivant les conditions d'altitude absolue ou relative de chaque station.

L'air, soumis à une dépression, se refroidit; soumis à une compression, il se réchauffe. Par conséquent une localité, située à une altitude donnée, verra de ce fait l'air, qui lui arrive de plaines plus basses ou de plateaux plus élevés, se refroidir ou se réchauffer par ces change-

ments locaux d'altitude, mais arriver en définitive au même degré relatif de température déterminée par l'altitude absolue de la station. La nappe du Léman étant à 372^{m} d'altitude, et l'air se refroidissant en moyenne de $^1/_2$ degré par 100^{m} de surélévation, que le vent lui arrive de la mer du Nord, de l'Atlantique ou de la Méditerranée, du fait de son ascension à 372^{m}, il abaissera sa température initiale de 1.9° environ. Quelle que soit sa direction, l'effet sera le même. Mais l'effet sera différent suivant le relief des pays que l'air aura traversés pour arriver dans notre station, par le fait des condensations aqueuses qui peuvent avoir lieu selon les circonstances. Si, dans son trajet, l'air remonte sur une pente continue, il se refroidit proportionnellement à l'altitude, et suivant son humidité absolue originelle, ou bien l'humidité relative sera accrue, ou bien il se fera des précipitations aqueuses. De toutes manières l'humidité relative sera exagérée, l'air sera humide. Si, au contraire, dans son trajet, l'air a rencontré une chaîne de montagnes qui l'a soulevé à de hautes altitudes, et, en le refroidissant, a déterminé de fortes condensations de pluies, quand il est redescendu de l'autre côté de la montagne et qu'il est revenu en plaine il s'est réchauffé sans se charger d'une quantité correspondante d'humidité, et il est relativement sec; non seulement il est plus sec, mais encore il est plus chaud. En effet, par la condensation de la vapeur d'eau, il y a eu de la chaleur latente dégagée, et l'air qui s'élevait en a été relativement réchauffé; dans sa descente et pendant sa compression il ne s'est produit aucune absorption de chaleur qui amène une action inverse, et l'air est resté relativement chaud. Autrement dit, après avoir franchi une chaîne de montagnes, par le fait des dilatations et compressions d'actions opposées, mais de même valeur, l'air reviendrait à sa température primitive; mais s'il y a eu des condensations aqueuses pendant la phase de dilatation, il sera de ce fait, plus sec et plus chaud. Pour chaque station, l'enceinte des montagnes qui la séparent de l'océan, et leur répartition dans les différents quadrants de l'horizon auront donc une influence importante sur la qualité des vents. Pour notre Léman, la grande chaîne des Alpes au S.-E., la chaîne du Jura, moins élevée au N.-W., à l'ouest et au S.-W., le plateau suisse moins élevé encore au N.-E., sans parler des chaînes plus éloignées des basses montagnes de France et d'Allemagne, seront d'influence déterminante pour la température et l'humidité des vents généraux.

Le troisième facteur est aussi variable suivant la localité. L'air qui a traversé de grandes étendues de mers, et surtout de mers chaudes, s'est chargé d'humidité; celui qui a parcouru de vastes territoires continentaux, où il a rencontré successivement diverses chaînes de montagnes, s'est desséché par des condensations de pluies successives. Une station sur les côtes de l'océan reçoit des vents humides venant de la mer, des vents secs venant de la terre. Le Léman n'est pas en contact direct avec l'océan ; il est à 200^{km} du golfe du Lion, à 300^{km} du golfe de Gênes, à 550^{km} de la Manche, à 600^{km} de l'Atlantique, à 950^{km} de la Baltique (à 3000^{km} de la mer polaire au nord de la Russie, à 8000^{km} de l'extrémité orientale de la Sibérie). Suivant donc le quadrant par où il nous arrive, l'air peut venir presque directement de la mer, ou bien être de l'air purement continental, être humide ou sec.

Tels sont les facteurs principaux qui donnent aux divers vents généraux leurs caractères particuliers et qui les rendent différents pour chaque station spéciale, suivant la position de celle-ci dans le continent par rapport à l'océan et aux montagnes. D'après cela chaque vent des divers quadrants devrait avoir ses allures et ses propriétés bien marquées. Il est cependant une circonstance qui les modifie et les altère dans une mesure assez notable. Suivant que le même vent est causé par un cyclone ou par un anticyclone, ou plus exactement suivant que, au moment de l'observation, c'est le centre du cyclone ou celui de l'anticyclone qui est le plus rapproché, l'action de l'un ou de l'autre étant prédominante, les caractères du vent peuvent être différents. Si le vent est de nature cyclonique, il est depuis longtemps engagé dans le tourbillon, il s'est assez longtemps promené à la surface de la terre pour avoir acquis les propriétés de vent horizontal inférieur ; s'il est de nature anticyclonique, il vient par le fait de la grande circulation aérienne des hauteurs de l'atmosphère, il est descendu récemment de la région des cirrus, il s'est réchauffé en descendant, mais il ne s'est pas chargé d'humidité, il est un vent sec. De ce fait il peut y avoir ainsi des différences assez notables dans les propriétés d'un vent soufflant dans le même quadrant, mais causé une fois par un cyclone, une autre fois par un anticyclone rapproché.

Cela dit, décrivons les vents généraux qui soufflent sur le Léman :

le s u d o i s, vent du sud-ouest,
la b i s e, vent du nord-est,
la v a u d a i r e, vent du sud-est,
le j o r a n, vent d'ouest.

I. — Le **sudois**, vent du sud-ouest, vent du midi, vent de pluie, vent de Genève des Vaudois, le vent sans autre qualificatif, le vent par excellence des riverains du Léman, est le courant d'air du côté dangereux des cyclones et anticyclones. C'est le vent général le plus fort et le plus fréquent des latitudes moyennes. Partout où la bise n'est pas renforcée par des circonstances locales, le vent du sud-ouest est le plus intense.

Sa fréquence dans notre région est donnée par les chiffres de l'Observatoire de Genève[1] pour la période 1847-75; le tableau suivant indique le nombre moyen de jours où a soufflé un fort vent sudois, d'intensité 2 et plus, l'échelle de la force des vents allant de 0 à 4.

Décembre	3.3 jours			
Janvier	3.2	hiver	9.4 jours	
Février	2.9			
Mars	4.5			
Avril	4.8	printemps	13.2	
Mai	3.9			
				Année 44.2
Juin	3.6			
Juillet	4.0	été	11.3	
Août	3.7			
Septembre	3.3			
Octobre	3.9	automne	10.3	
Novembre	3.1			

D'après ces chiffres, la fréquence du vent sudois est le plus grande au printemps et en été, le moins grande en automne et surtout en hiver : les mois qui présentent le plus de vent du sud sont mars et avril, celui qui en a le moins est février.

L'intensité du vent sudois est en général moins violente dans notre vallée que celle du vent du nord. Cependant lorsque le cyclone est très serré, le vent prend une intensité d'ouragan. J'en donnerai des exemples plus loin.

D'après la configuration du lac et la distribution des côtes, le vent sudois souffle également sur tout le lac, à l'exception du Haut-lac à l'orient de Meillerie et Vevey, région qui est plus ou moins protégée par les montagnes. Ce n'est que lorsque le vent s'infléchit vers l'ouest qu'il vient battre cette région du Haut-lac.

Les vagues du sudois sont nulles à Genève et dans le golfe de Coudrée; elles atteignent leur maximum de Morges à Vevey, et surtout

(1) *E. Plantamour.* Climat de Genève, II, 212.

sur les rives de LaVaux. La direction du vent sudois normal est du S.-W. au N.-E., soit parallèlement à l'axe du lac de Genève à Morges, ou encore parallèlement à la chaîne du Jura. Cette direction est celle du vent dominant des mouvements cycloniques se dirigeant du S.-W. au N.-E.; elle est, dans notre vallée, favorisée par la direction des chaînes de montagnes. Il est plus rare que le vent prenne la direction du sud ou de l'ouest; une différence de quelques points lui laisse ses caractères généraux. Mais elle modifie considérablement l'activité des vagues dans les diverses stations de la côte sous le vent; quand le sudois vient directement du midi et souffle en bornan, suivant l'expression indigène, il vient battre directement la rive vaudoise de Rolle à Ouchy, et les vagues y sont alors à leur maximum; quand il s'infléchit vers l'est, et que venant de l'ouest il se rapproche du joran, il enfile le Grand-lac dans toute sa longueur, ses vagues frappent presque normalement la côte d'Ouchy à Villeneuve et leur action se prolonge jusqu'au Bouveret.

Le vent sudois venant de latitudes plus méridionales, et par conséquent plus chaudes, est un vent chaud et humide. Il est généralement caractérisé par un ciel nuageux, et par la pluie; quelquefois, mais exceptionnellement, il porte quelques nuages orageux (voir plus bas).

En été, nous avons parfois un vent du midi avec un ciel serein, vent blanc. Le soleil brillant qui l'accompagne lui donne une chaleur intense, brûlante, de là le nom de maurabia [1] que lui donne le paysan vaudois. Généralement, le vent blanc se transforme progressivement, au bout de la journée, en vent de pluie.

Le vent du midi souffle pendant un ou plusieurs jours de suite; les chiffres suivants de l'observatoire de Genève, tirés de la période 1847 à 1861 [2] donneront une idée de cette durée.

Vent du midi ayant duré	1 jour	331	fois	soit	63 %
»	2 jours	138	»	»	26
»	3	37	»	»	7
»	4	11	»	»	2
»	5	4	»	»	1
»	6	3	»	»	1
»	7	1	»	»	0.2

De beaucoup les plus fréquents sont les cas où le vent a duré un

(1) Maura-blla, qui mûrit le blé.

(2) *E. Plantamour*, I, 169.

ou deux jours; ils représentent les 89 pour cent des événements. Ceux de trois jours sont très peu nombreux.

Quant à la vitesse du courant d'air, par le vent sudois, je la tire des observations anémométriques de Berne, 1884-88, (1) et j'y trouve comme maximum 78^{km} à l'heure, soit 21.7^{m} à la seconde, 6 mars 1885, de 3 à 4 heures du soir, pour la vitesse horaire de l'air dans les couches inférieures. Je ne connais pas de mesures de cette vitesse dans les couches supérieures. J'aurai à indiquer une vitesse encore plus forte lorsque j'étudierai les ouragans, tornados et trombes, dans un chapitre suivant.

II. — La **bise**, vent du nord-est, est le vent général le mieux caractérisé de la région du Léman. Il y a une intensité et une fréquence remarquables, beaucoup plus prononcées que dans la Suisse orientale, et que dans l'Europe centrale prise dans son ensemble. Sur la rive vaudoise, d'Ouchy à Rolle, il s'y ajoute les morgets, morget de la période journalière, morget d'automne, morget de neige, qui soufflent dans la même direction. Aussi les courants du nord y sont-ils dominants.

La bise, le vent général du nord-est, est provoquée par le passage d'un cyclone au sud de notre région, sur le nord de la Méditerranée, ou par un anticyclone dans le nord de la France ou de l'Allemagne. Elle nous amène de l'air venant des régions du nord, plus froid par conséquent que l'air normal de la vallée; c'est donc un vent froid. En passant de climats plus froids à des climats plus chauds, elle s'est réchauffée, sans gagner notablement d'humidité; d'une autre part, elle arrive de pays continentaux et n'a pas traversé de mers; ces deux circonstances en font un vent sec. Vent sec et froid, l'air n'est pas chargé de nuages, le soleil brille dans un ciel serein; c'est un vent de beau temps. Ce n'est que là où elle vient frapper la muraille des Alpes, quand elle se relève assez pour se refroidir jusqu'au point de saturation, que l'on voit parfois, par la bise, se développer des nuages locaux. Il est cependant une variété de vent du nord, la bise noire, dans laquelle le ciel est entièrement couvert de nuages; c'est le temps le plus triste et le plus désagréable que nous ayons à subir; froid, humide et venteux, il réunit tous les symptômes fâcheux de la température la plus inclémente. L'on suppose que dans ce cas il y a un cou-

(1) Annalen der schweiz. meteorolog. Central-Anstalt, Zürich.

rant d'air supérieur venant du sud, air chaud et humide dont la vapeur d'eau se condense en nuages à la limite inférieure, en contact avec la bise ; mais je dois avouer n'avoir jamais vu par la bise noire les nuages marcher vers le nord. Il est vrai que, d'en bas, nous ne pouvons voir que la surface inférieure de la nappe des nuages, et que les couches supérieures peuvent avoir une direction toute autre. Il serait possible aussi que la nappe des nuages de la bise noire fût simplement la condensation de la vapeur d'eau d'un air relativement humide, par l'effet du froid des altitudes supérieures ; la bise noire serait, dans cette supposition, une bise plus humide que la bise ordinaire.

La bise souffle avec toute son intensité dans la partie occidentale du lac, de Lausanne à Genève ; il semble que le rapprochement progressif des murailles formées par le Jura et par les Alpes constitue une espèce d'entonnoir qui renforce la puissance du courant d'air. La côte abrupte de La Vaux entre Lausanne et Vevey, la muraille élevée des Alpes vaudoises de Clarens à Villeneuve abritent contre la bise les rives fortunées du Haut-lac. La bise peut faire merveille du côté de Genève, pendant qu'à Montreux l'air est calme, le ciel serein ; ce sont les jours de triomphe de cette Riviera du Léman.

Par la bise, les vagues sont nulles sur la côte vaudoise, de Villeneuve à Morges, le vent soufflant de la terre vers le lac ; elles sont à leur maximum sur la côte de Savoie, dans la Grande-Conche, et dans le Petit-lac jusqu'à Genève.

La fréquence de la bise est donnée par les observations de Genève, 1847-1875. ([1]) Je réunis en tableau le nombre moyen des jours où la bise a soufflé avec une intensité supérieure à 2.

Décembre	4.4 jours	hiver	12.2 jours	
Janvier	3.7			
Février	4.1			
Mars	5.7	printemps	12.9	
Avril	3.8			
Mai	3.4			
Juin	3.1	été	7.9	*Année* 42.0js
Juillet	2.0			
Août	2.8			
Septembre	2.4	automne	9.0	
Octobre	2.3			
Novembre	4.3			

([1]) *E. Plantamour*, II, p. 209.

Le maximum de fréquence annuelle de la bise dans ces 29 années a été 61 jours en 1858, le minimum 16 jours en 1872.

Les mois les plus riches en bise sont, d'après ces chiffres, mars, décembre et novembre; les plus épargnés par ce vent, juillet et octobre.

Si nous additionnons les valeurs moyennes mensuelles du sudois et de la bise, les vents dominants de notre vallée, nous trouvons que mars présente le maximum de forts vents, avec 10.2 jours dans le mois, septembre le minimum, avec 5.7 jours.

E. Plantamour a calculé quelle était pour la période 1847 à 1861 la durée moyenne de la bise, et il a trouvé pour ces 15 années les chiffres suivants : (1)

Bise ayant duré	1	jour	197	fois	soit	52 %
»	2	jours	99	»	»	26
»	3		49	»	»	13
»	4		16	»	»	4
»	5		7	»	»	3
»	6		4	»	»	2
»	7		1	»	»	1

D'après cela, la bise ne dure le plus souvent qu'un jour et, dans plus des trois quarts des circonstances, elle ne dure que un ou deux jours. Le dicton populaire, qui veut que la bise dure trois, six ou neuf jours, est réfuté par ces chiffres, et nous devons le déclarer inexact sous sa forme trop absolue. Cependant je suis disposé à lui attribuer une certaine raison d'être; je me base sur le fait que la vitesse de translation des cyclones qui déterminent les vents généraux est telle que nous sommes ordinairement pendant trois jours environ sous leur influence; que d'autre part on voit souvent les cyclones se suivre en chapelet sur la carte météorologique de l'Europe, et, à peine un cyclone passé, il en arrive un nouveau sur la même trace. Malgré la rigueur de la statistique météorologique, je souscrirais donc volontiers à l'adage populaire, et je lui reconnais une certaine justesse, aussi bien pour la bise que pour le vent sudois dont nous avons parlé précédemment.

La bise est souvent d'une intensité extrême : parmi les vents généraux, elle est, chez nous, probablement le plus violent. Nous n'avons pas encore de mesures exactes de la vitesse du vent à terre, par le moyen d'anémomètres, dans la vallée du Léman. Des observations de Berne de 1885 à 1888, qui nous donnent la vitesse horaire, j'ai tiré la

(1) *E. Plantamour*, I, p. 169.

vitesse maximale, observée dans ces quatre années, de 61 kilomètres à l'heure, soit 17^{m} à la seconde, le 16 novembre 1885, entre 1 et 2^{h} du jour. En cherchant à mesurer la vitesse de la bise par le déplacement des nuages, nous sommes arrivés aux chiffres suivants :

M. Ch. Dufour, à Orbe, le 4 mars 1851 : 20$^{m\ sec}$.

Fr. Burnier, à Morges, le 25 avril 1854 : 25$^{m\ sec}$.

F.-A. Forel, à Morges, le 27 septembre 1867 : 25.5$^{m\ sec}$, soit 92^{km} à l'heure.

Nous avons établi dans nos généralités que le vent du sud appartient au quadrant dangereux des cyclones, lé vent du nord au quadrant maniable ; que par conséquent le premier doit être plus intense que le second. Nous ne sommes pas à même d'étudier la vitesse relative des vents dans notre région ; nous manquons d'observations précises et nous devons attendre que les anémomètres enregistreurs de Genève [1] fonctionnent à satisfaction. Il est impossible en effet de se fier, pour ces recherches, aux appréciations des observateurs, les seules dont nous disposons jusqu'à présent : des facteurs nombreux, la température, l'humidité de l'air, le plus ou moins de protection de la station contre le vent de certaines directions, la grandeur des vagues si l'observatoire est près d'un lac, influent trop sur des évaluations sans instruments ; il faut, pour juger ces questions de degré, l'incorruptibilité d'un appareil mécanique.

Nous pouvons, en revanche, faire une comparaison utile entre la fréquence relative des deux vents principaux. Le nombre des jours de l'année où, à Genève, soufflent les vents du nord et les vents du sud est à peu près le même ; mais leur répartition dans les diverses saisons est différente. Si nous mettons en présence les valeurs moyennes mensuelles des deux vents opposés, telles que nous les avons données dans les tableaux des pages 319 et 322, on y voit immédiatement une prévalence marquée des vents du nord pendant l'hiver, des vents du sud pendant l'été ; la séparation entre les deux régimes a lieu au commencement d'avril et au commencement de novembre. Deux additions justifieront ce dire, en donnant le total de l'apparition des deux vents dans une année moyenne (avec une intensité de 2 et plus).

	sudois	bise
De novembre à mars	17.0 *jours*	22.2 *jours.*
D'avril à octobre	27.2 »	19.8 »

[1] Genève est parmi les stations météorologiques de la vallée celle dont l'observatoire est le mieux situé pour l'étude des vents généraux.

La bise est plus fréquente dans la saison froide, le vent sudois dans la saison chaude. La cause immédiate de ces prédominances est que les cyclones passent plus nombreux ([1]) en hiver sur la Méditerranée septentrionale, en été sur la Manche et la mer du Nord; quant à la cause première de ces différences d'allures des cyclones, je laisse à d'autres le soin de la rechercher.

III. — La **vaudaire,** vent du sud-est, connu dans la Suisse allemande sous le nom de föhn. La vaudaire est un vent du S.-E. qui sortant de la vallée du Rhône, souffle avec violence sur le Haut-lac; le vent arrive rarement au-delà de Lausanne, très rarement au-delà de Morges.

Pendant longtemps on a attribué au föhn, et par suite à la vaudaire, une origine lointaine, étrange; on les faisait venir d'Italie et d'Afrique. Depuis que les cartes météorologiques permettent de suivre l'état de la pression sur l'Europe, il est évident que le föhn est causé par des cyclones dont le centre est situé au sud-ouest, à l'ouest ou au nord-ouest de notre région. C'est un vent du sud qui passe par-dessus les montagnes en obliquant vers le N.-W. ([2]) La coïncidence entre le vent sudois dans la partie occidentale du Léman et la vaudaire dans la partie orientale a été observée par tous ceux qui donnent attention aux choses du lac; fréquemment l'on voit entre Morges et Vevey les lames de la vaudaire se quadriller sur le lac avec celles du vent de Genève.

La vaudaire a pris en traversant la chaîne des Alpes les caractères qui lui sont particuliers; c'est un vent soufflant par bouffées, très chaud et très sec. Il souffle par bouffées parce que, appartenant à un courant d'air supérieur, ou plutôt relevé à une grande hauteur par la muraille des Alpes, ce n'est qu'exceptionnellement que son souffle vient jusque au niveau du sol. Il est un vent sec parce qu'il s'est débarrassé par les pluies, sur les Alpes, et spécialement sur le versant italien, de son

([1]) Je dis passage plus fréquent des cyclones, et non pas, comme on le prétend trop souvent, existence d'un minimum hivernal sur la Méditerranée, d'un minimum estival sur la mer du Nord. Les minimums barométriques, que montrent les cartes des moyennes mensuelles ou saisonnières des isobares, sont en effet une résultante du passage individuel et répété de nombreux cyclones suivant certaines routes: les maximums au contraire résultent ordinairement du stationnement d'un anticyclone dans les espaces laissés libres entre les trajectoires des cyclones.

([2]) Voir, au sujet de la vaudaire, la remarquable monographie du prof. *Louis Dufour*: le föhn du 23 septembre 1866 en Suisse. Bull. S. V. S. N. IX 506, Lausanne 1867; pour la théorie générale du föhn, les travaux de M. Hann de Vienne.

excédent d'humidité; il est un vent chaud parce que, tombant des hauteurs pour arriver au sol, il s'est comprimé et a, par la chute, élevé sa température. Les vagues de la vaudaire peuvent être énormes, de Vevey à Morges; à Morges, elles sont parmi les vagues les plus violentes que nous connaissions.

Je donnerai une idée de la fréquence de ce vent, d'après mes notes de l'année 1877, à Morges.

1877	Le vent est venu jusqu'à Morges	Les lames de vaudaire sont venues à Morges
Janvier	4 fois	5 fois
Février	—	2
Mars	1	1
Avril	1	1
Mai	3	1
Juin	1	—
Juillet	2	1
Août	1	—
Septembre	—	—
Octobre	—	—
Novembre	1	1
Décembre	5	—
Année	19	12

Ainsi, d'après ces notes, la vaudaire aurait soufflé au moins 31 fois sur le Haut-lac. Il est probable que nombre de cas de vaudaire m'ont échappé.

IV. — Le **joran,** vent du nord-ouest, est rare et mal caractérisé : il se confond avec le vent sudois dont il a tous les caractères, à savoir d'être un vent continu, chaud et humide. Sa direction fait seule une différence, en ce qu'il enfile la région orientale du lac et que ses vagues se font sentir jusqu'aux bouches du Rhône.

Nous retrouverons plus tard le joran parmi les vents d'orage.

On connaît la loi générale de succession des vents : après les vents du sud viennent les vents d'ouest, puis ceux du nord. Quand un cyclone passe au nord de notre région, il nous atteint par son bord antérieur, nous sommes dans le courant d'air venant du sud; plus tard, il nous traverse par son bord méridional où règnent les vents de l'ouest,

puis par son bord postérieur, le domaine des vents du nord. C'est ce qu'exprime fort bien le dicton vaudois :

« Le joran qui suit le vent (1)
Tient la bise par la man. » (la main)

3° VENTS D'ORAGE

A côté des brises régulières déterminées par les différences d'échauffement de la terre et du lac, à côté des vents généraux causés par les grands phénomènes cycloniques de la circulation aérienne, nous avons à signaler les vents d'orage. Ils ne sont pas spéciaux au lac, mais ils l'intéressent, soit par les vagues qu'ils soulèvent, soit par les seiches qu'ils déterminent ; ils sont du reste un des phénomènes importants du climat de la vallée. Nous allons donc essayer, non pas d'en faire la théorie, ce n'est pas de ma compétence, mais d'en esquisser les traits généraux.

L'atmosphère n'est jamais au calme absolu sur toute la terre. Par suite des différences de température qui existent entre l'équateur et les pôles, entre les continents et l'océan, il s'établit normalement la circulation aérienne des vents alizés, moussons, etc.; ces déplacements de l'air sont accompagnés, suivant les circonstances locales, de compression ou de dilatation de l'air lui-même, de condensation de la vapeur d'eau et de dégagement d'électricité, qui altèrent la sérénité de l'atmosphère et qui donnent aux saisons et aux climats leurs caractères spéciaux, différents dans les différentes régions. C'est là un premier ordre de perturbations atmosphériques, mais elles sont pour ainsi dire normales ; elles sont soumises à des lois régulières ; sous les mouvements qu'elles déterminent, on peut reconnaître le calme relatif. C'est à des phénomènes de ce groupe, mais sur une échelle très réduite, que nous pouvons rattacher les brises locales, de périodicité journalière.

Un second ordre de perturbations atmosphériques comprend les grands mouvements tourbillonnants des cyclones et anticyclones, qui sont déjà plus irréguliers, plus accidentels, dont le développement,

(1) Le vent du sud, le sudois.

l'apparition et la marche sont soumis à des lois qui nous échappent encore. Suivant les saisons, ils ont une tendance à suivre des routes différentes; les cyclones, par exemple, pendant l'hiver traversent plutôt l'Atlantique et la Méditerranée, pendant l'été traversent plutôt le continent européen. Ces perturbations de vaste amplitude, à grandes allures, régissent le temps, le temps qu'il fait, le temps météorologique.

Un troisième ordre de perturbations est celui des troubles locaux et passagers de l'atmosphère, occupant un espace relativement peu étendu, durant peu; des altérations subites, rapides, violentes, de courte durée, du calme atmosphérique. Ces altérations sont toutes plus ou moins caractérisées par le développement de nuages, par des chutes de pluie, parfois de grêle, par l'abaissement de la chaleur, par des phénomènes électriques divers, depuis la simple augmentation de tension jusqu'à la décharge de la foudre, enfin par des vents plus ou moins violents. Ces perturbations sont les orages, ouragans, tornados, tempêtes, etc. Leur symptôme dominant, le vent, nous oblige à nous en occuper ici.

Il est probable que cette classe de perturbations est très complexe et qu'il y aurait lieu de la diviser en types nombreux, divers soit par leur origine, soit par leurs manifestations. Il est possible que les unes soient dues originairement à des phénomènes thermiques, les autres à des phénomènes électriques, les autres à des phénomènes mécaniques (courants d'air). La météorologie scientifique moderne s'occupe avec ardeur de cette étude; elle n'est pas encore arrivée à des conclusions définitives et certaines; les lois et théories des phénomènes ne sont pas encore débrouillées d'une manière classique. Dans cet embarras, et n'ayant point charge de légiférer en météorologie, étant obligé d'autre part pour certaines questions d'intérêt limnologique, les seiches par exemple, de m'éclaircir les notions sur ces phénomènes qui nous touchent de si près et remuent si profondément le lac, je vais exposer la manière purement empirique dont je comprends les perturbations locales de l'atmosphère.

Les perturbations locales et rapides de l'atmosphère peuvent être classées en :

I. *Perturbations avec mouvement tournant :*

a. Cyclone et anticyclone.

b. Tornado, ouragan.
c. Trombe.

II. *Perturbations atmosphériques sans mouvement tournant :*
d. Orage.

Au premier groupe appartiennent tous les mouvements tournants, depuis le cyclone, qui traverse le continent avec un diamètre de quelque 10, 20 ou 30°, jusqu'au tornado, à l'ouragan-cyclone, d'un plus petit diamètre, quelques kilomètres seulement, mais d'une plus grande violence; jusqu'à la trombe enfin, mouvement tournant de quelques centaines ou quelques dizaines de mètres de diamètre, dont la violence peut être parfois excessive. Plus le mouvement est concentré sur un petit diamètre, plus il est terrible dans ses manifestations, plus aussi les phénomènes caractéristiques des perturbations atmosphériques y sont intenses; les nuages sont plus serrés et plus épais, la pluie et la grêle sont plus désastreuses, la tension et les décharges électriques sont plus violentes, le vent tourbillonnant est plus destructeur.

Dans ces divers phénomènes, la direction du courant d'air est toujours, pour autant que nous le savons, centripète. Dans les cyclones, la convergence en spirale des vents est un fait démontré; dans les tornados, le mouvement tournant est incontestable (ouragan du 20 février 1879, ouragan du 19 août 1890), la convergence est probable puisque l'ouragan n'est qu'un cyclone de petit diamètre; dans les trombes enfin, le mouvement ascendant à la partie inférieure est constaté toutes les fois que le phénomène est assez lent dans ses allures pour qu'on puisse l'observer (tourbillons de poussière des routes, trombes des auteurs). Nous pouvons donc attribuer à ces mouvements tournants les caractères suivants :

Vents spirales convergents à la partie inférieure; mouvement, au centre de la colonne tourbillonnante, vertical ascendant dans la région inférieure. D'après ce que nous savons des cyclones, la pression est fortement diminuée sous le centre du tourbillon.

Tout autre est le mouvement de l'air dans les perturbations sans mouvements tourbillonnants, que nous appelons orages, et que nous allons décrire. Cet orage local n'est pas admis par nombre de météorologistes français; nous autres habitants des pays de montagnes qui l'observons tous les jours en été, nous ne pouvons que le constater et en affirmer l'existence.

Quand le soleil échauffe le sol et par suite l'air en contact avec ce sol, les couches inférieures de l'air peuvent acquérir une température tellement plus élevée que celle des couches supérieures que, malgré leur plus forte compression, leur densité devienne plus faible et qu'elles tendent à s'élever. Cette rupture d'équilibre se fera au sommet d'une colline ou d'une montagne, et l'air chaud s'élèvera verticalement dans les hauteurs en une aspiration prolongée. L'air chaud et humide, s'élevant à de grandes hauteurs, se refroidit en se dilatant, se refroidit aussi par mélange avec un air plus froid, et il en résulte la formation des cumulus, nuages d'orage que nous voyons se développer sur chaque sommet de montagne, dans l'après-midi des belles journées d'été. Par suite de la condensation de la vapeur d'eau, il doit y avoir fort dégagement d'électricité, et le nuage d'orage doit avoir une forte tension électrique. C'est la première phase du phénomène.

Le nuage d'orage se dissipe habituellement au bout de quelques heures, et dans la soirée le ciel reprend sa sérénité. L'orage avorte.

Mais lorsque le nuage est trop fort, que la tension électrique est trop puissante, la deuxième phase arrive, l'éclat de l'orage, l'orage proprement dit. L'orage est caractérisé par les phénomènes suivants : décharges électriques — éclairs et tonnerres, — chutes de pluie ou de grêle, refroidissement de la température de l'air, vent. Ces différents facteurs peuvent se trouver réunis, alors l'orage est parfait ; ils peuvent être isolés, ou bien l'un d'eux être prédominant, alors on a affaire à un orage de vent, un orage de pluie, un orage de grêle, un orage électrique.

L'étude des phénomènes connus me fait avancer que dans l'orage il y a normalement un coup de vent vertical descendant. En effet, quand je considère un orage qui éclate dans le voisinage de l'endroit où je me trouve, je constate toujours, ou presque toujours, ([1]) l'existence d'un vent horizontal venant de la région centrale de l'orage ; ce vent chasse la pluie dans la direction des régions encore calmes et sereines. Du fait que ce vent à direction centrifuge s'observe toujours, quelle que soit la direction de l'orage, je conclus qu'il existe tout autour de l'orage ; que par conséquent l'orage détermine autour de lui des coups de vent divergents, s'irradiant loin du centre de la perturbation. Or cette direction centrifuge est le caractère d'un vent de

([1]) Dans les cas où ce vent centrifuge ne s'observe pas dans une station, il est d'autant plus fort dans les autres stations autour de l'orage.

refoulement, en opposition aux vents d'appel dont la direction est centripète. D'un autre côté, en épuisant la série des possibilités, on arrive à voir que s'il y a refoulement de l'air, ce refoulement ne peut être produit que par la chute verticale d'une colonne d'air partant du nuage orageux et tombant sur le sol, où elle s'aplatit en s'irradiant et en devenant horizontale. Donc, dans la région centrale, au moment où éclate l'orage, il y a normalement un coup de vent vertical descendant. Nous avons, dans des proportions plus petites, plus tranquilles, et par conséquent plus faciles à étudier, le même phénomène dans ce qu'on appelle les *airs de pluie*. Chaque fois que par un temps calme un nuage isolé éclate en pluie sur le lac, nous voyons s'irradier, autour de cet orage à puissance atténuée, de faibles coups de vent, qui, partant de l'averse, vont en divergeant tout autour. Au moment de la condensation de la pluie, l'air s'est refroidi, s'est alourdi, est tombé sur le lac et, heurtant la surface de l'eau, s'est aplati en devenant horizontal. Le même phénomène a lieu dans l'orage parfait, l'orage à grêle et à phénomènes électriques, mais avec une intensité infiniment plus forte. Que le coup de vent vertical descendant de l'orage soit des plus violents, c'est ce qui résulte de l'intensité souvent extrême du courant d'air horizontal ; le refoulement qui a pu produire les coups de vent d'orage dont nous avons gardé le souvenir a dû être d'une puissance extrême ; nous trouverons plus loin dans le phénomène des seiches la preuve de l'énergie de ce coup de vent vertical descendant.

Mais comment justifier une telle différence dans l'intensité du vent ? Dans les airs de pluie des brises à peine sensibles, dans le vent d'orage une bourrasque qui brise et renverse tout ! Sans vouloir expliquer le phénomène j'en puis du moins montrer la probabilité par la considération du froid prodigieux qui se développe parfois au milieu de l'orage ; je n'ai qu'à rappeler les chutes énormes de glaçons qui, dans certains orages de grêle, montrent la disparition subite de millions et de millions de calories par la production du froid nécessaire à la congélation de mètres cubes, de milliers de mètres cubes de glace. (1)

(1) M. Ch. Dufour a calculé que dans l'orage du 21 août 1881, la couche de grêlons tombés sur 10^{km^2} du district de Morges devait représenter un volume de plus de $100\,000^{m^3}$ (Bull. S.V.S.N., XVIII, 69, 1882.) A raison de 79 calories pour la chaleur latente de la glace, un volume de $100\,000^{m^3}$ d'eau nécessite pour se solidifier un dégagement de chaleur de 7 900 millions de calories. Cette quantité énorme de chaleur aurait dû considérablement réchauffer l'air, et cependant après la chute de grêle chacun a remarqué un refroidissement sensible : toute cette chaleur et plus encore a donc été absorbée par transformation en d'autres forces.

Ce froid excessif, qui gèle l'eau, refroidit l'air, le rend plus lourd et le fait tomber en masse sur le sol.

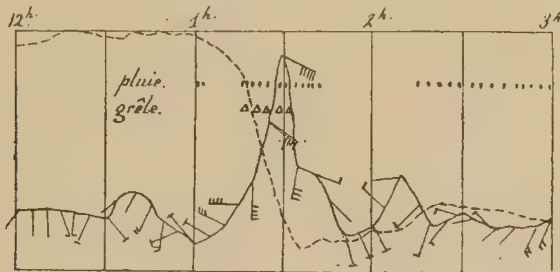
Quelle est la cause de ce froid énorme? Ici nous entrons dans le domaine des hypothèses, et mon rôle n'est pas de les discuter. Je ne puis pas cependant résister au désir de citer ici la belle interprétation émise par W. Eisenlohr. Voici les termes mêmes du physicien de Carlsruhe; ils sont éloquents dans leur concision : [1] « Là où il s'élève « beaucoup de vapeur d'eau, il se forme fréquemment des orages, et « là où se forment des orages la chaleur disparaît; c'est un fait bien « constaté, mais dont aucun physicien n'a encore donné l'explication : « peut-être que la chaleur dégagée s'emploie comme travail à la pro- « duction des phénomènes électriques. » Dans le nuage orageux il y aurait transformation directe de la chaleur en électricité, de là le développement énorme d'électricité de certains orages, de là la disparition de chaleur, le refroidissement constaté par la formation de la grêle, et par le coup de vent de l'orage. On m'objectera que le coup de vent de l'orage n'est pas aussi extraordinairement froid que semblerait le demander cette théorie; à cela je répondrai en invoquant le réchauffement de cet air par la compression et par le choc porté sur le sol.

Quoi qu'il en soit, je ne puis interpréter autrement le fait d'un vent horizontal, divergeant autour de l'orage, qu'en admettant le refoulement de l'air par une colonne d'air descendant verticalement du nuage orageux. Cette colonne d'air descendante est capable, comme nous le verrons, de produire sur le lac un choc d'une très forte intensité; j'y trouverai les éléments voulus pour la production des seiches.

Y a-t-il variation de la pression atmosphérique pendant l'orage? Dans quel sens cette variation a-t-elle lieu? Les auteurs que j'ai pu consulter sont très peu explicites sur cette question et sont souvent en désaccord; j'en conclus que s'il y a variation de la pression pendant l'orage, cette variation est peu évidente et peu considérable. Mon collègue, feu le professeur J. Marguet, de Lausanne, estimait qu'au moment de l'orage il y a une légère hausse du baromètre, de quelques dixièmes de millimètres, allant jusqu'à 1.0 et même et 1.5^{mm} de mercure. Je crois la chose probable, elle est conforme à la théorie; tout vent de refoulement implique en effet une certaine compression de

[1] *W Eisenlohr*. Lettre sur les phénomènes glaciaires. Annuaire du Club alpin suisse 1868, p. 443.

l'air, et est par conséquent accompagné d'une légère hausse du baromètre. Mais il doit y avoir plus. Dans la région centrale de l'orage, si notre hypothèse est exacte, le courant d'air descendant, en venant frapper contre le sol, doit occasionner une hausse d'un caractère tout particulier. En effet, avant que l'air refoulé par la colonne descendante ait eu le temps de fuir et de se dérober sous la forme d'un vent horizontal centrifuge, il doit subir une compression d'autant plus forte que le choc porté est plus intense : cette compression doit se traduire par une hausse rapide du baromètre. Cette hausse doit être de peu de durée; en effet, le coup porté par la chute de la colonne descendante est presque instantané, et le courant d'air de refoulement s'écoule presque immédiatement, avec violence. Cette hausse assez importante, presque subite et de très peu de durée, ne doit pas différer beaucoup des secousses du baromètre qui existent dans les cas de vent de tempête ; elle doit être plus forte, car les conditions de sa production sont encore plus favorables que dans la rafale d'un vent horizontal qui vient se heurter contre la façade d'une maison.



(Fig. 36.) Orage du 25 juillet 1872, à Upsal, d'après *S.-A. Hjeltström.*
Courbe pleine : baromètre 1mm mercure — 20mm.
Courbe ponctuée : thermomètre 1° — 2mm.
1 heure — 24mm.

Cette hausse barométrique a été constatée au centre de l'orage. Depuis que j'ai, pour la première fois, émis ces vues hypothétiques sur l'orage local, (1) un météorologiste suédois, le Dr S. A. Hjeltström, dans l'intention de vérifier mes conclusions, a fait l'analyse très attentive d'un orage qui a frappé sur l'observatoire même d'Upsal, le 25 juillet 1872. (2) Les conditions générales étaient celles d'un orage

(1) *F.-A. Forel.* Les causes des seiches. Arch. de Genève, LXIII, 197, 1878.
(2) *S.-A. Hjeltström.* Hagelfallet i Upsala den 25. juli 1872. Upsala 1879.

local, et tous les détails du phénomène ont parfaitement correspondu à ceux que la théorie m'avait fait supposer; forte augmentation de la pression atmosphérique, fort abaissement de la température, vent violent divergeant autour du centre de l'orage. Je donne dans le diagramme (fig. 36) le tracé des appareils enregistreurs d'Upsal, baromètre, thermomètre, ainsi que l'indication de la direction et de la force du vent par le moyen de flèches plus ou moins barbelées : le vent a changé de direction au moment même de l'orage, et a soufflé constamment en venant du centre du nuage orageux. Cette démonstration de M. Hjeltström confirme absolument et complètement mes vues théoriques. Je puis encore donner comme exemple la courbe barométrique publiée par M. A. Riggenbach [1] de l'orage du 27 août 1890, à Bâle; au début de l'orage, à 6^h du soir, le barographe montre une ascension subite de 2^{mm} de mercure.

Depuis l'année 1878, j'étudie attentivement le développement des orages locaux, et je puis dire que toujours, dans l'orage d'été, je constate l'existence du vent horizontal divergent de la théorie; je n'ai remarqué aucun fait qui soulevât des doutes dans mon esprit. Je dois cependant ajouter que les cartes des orages, telles qu'elles sont publiées depuis quelques années, entre autres dans les Annales de l'institut central de météorologie de Zurich, nous font voir que les orages ont fréquemment une tendance à se promener, à se déplacer, parfois à une assez grande distance; entraînés avec une vitesse qui varie de 24 à 72^{km} à l'heure, en moyenne 47^{km} ^{h}, soit 13^m à la seconde, d'après les cartes suisses de l'année 1888, ils parcourent souvent une vaste étendue du pays. Est-ce que l'orage une fois développé se mettrait ainsi en mouvement pour s'avancer dans une direction déterminée? ou les orages mobiles auxquels je fais allusion seraient-ils des tornados de faible intensité ou de petites dimensions? Je n'ai pas les éléments nécessaires pour résoudre cette question. Quoi qu'il en soit, je crois donc pouvoir confirmer et maintenir l'existence de l'orage local causé par l'explosion d'un nuage orageux, lequel est formé lui-même par l'ascension rapide dans les régions supérieures d'une masse d'air surchauffé à la surface du sol.

Il y a encore lieu d'indiquer l'existence d'un autre type d'orage qui se développe dans des circonstances bien différentes. Quand il règne

[1] Witterungsübersicht des Jahres 1890. Verhandl. der Naturforsch. Gesellsch. in Basel. IX, 2. p. 547. pl. V.

un vent du midi, à température particulièrement élevée, que l'atmosphère est parcourue par des nuages isolés, on voit parfois un de ces nuages éclater en un orage peu intense et de peu de durée : quelques éclairs, deux, quatre, guère plus, une averse de pluie, et voilà tout; quelquefois une averse de grésil; jamais de grêle proprement dite. Ces petits orages se répètent souvent plusieurs fois dans la journée.

A côté des orages locaux, sans mouvements tournants de l'air, l'autre classe de perturbations atmosphériques à courte durée est formée par des tourbillons plus ou moins mobiles de l'air qui portent le nom de trombes quand ils sont de petites dimensions, de 5, à 10, à 100^{m} de diamètre, et tornados quand ils dépassent cent ou mille mètres de largeur. Quelle en est la cause déterminante? Sont-ce des phénomènes mécaniques, thermiques ou électriques qui les provoquent? La cause en est-elle toujours la même? A d'autres de juger ces questions difficiles. Toujours est-il qu'il y a constamment ou presque constamment dans ces phénomènes un puissant tourbillon d'air, à giration circulaire en spirale, se déplaçant plus ou moins rapidement, des perturbations thermiques amenant grandes condensations de vapeurs, production de nuages, violentes chutes d'eau et de grêle, d'énormes perturbations électriques avec les manifestations les plus diverses, depuis l'effluve électrique généralisée jusqu'aux décharges les plus serrées de foudres et de tonnerres. Parfois le phénomène est innocent comme les trombes nuageuses qu'avec un peu d'attention on observe chaque année dans l'air; parfois il est d'intensité terrible comme les ouragans dont l'histoire garde le souvenir.

Le plus récent et le plus désastreux pour notre pays est le tornado du 19 août 1890, qui a ravagé le Jura français et vaudois, d'Oyonnax à St-Claude, la vallée de Joux, Romainmôtier et Croy. (1) Mais il n'a pas touché le lac Léman, et je préfère citer comme exemples ceux du 18 juillet 1841 et du 20 février 1879. Je décrirai rapidement ce dernier.

Ouragan du 20 février 1879. Cette tempête, l'une des plus effroyables qui aient ravagé nos contrées, a été un cyclone secondaire, développé dans le quadrant sud-oriental d'un cyclone primaire, dont le centre passait au nord des Iles britanniques. — Depuis le 7 février,

(1) *L. Gauthier.* Notice sur le cyclone du 19 août 1890. Bulletin S. V. S. N. XXVII, p. 1, 1891.

l'état météorologique de l'Europe était fort troublé : la pression atmosphérique était basse et une série de cyclones se succédaient à la surface du continent ; [1] le 19 février, la carte météorologique n'en indiquait pas moins de trois sur l'Europe, l'un sur la mer du Nord, l'autre sur la Baltique, le troisième sur la plaine du Danube ; la baisse du baromètre en Irlande annonçait l'arrivée d'un quatrième cyclone. Le 20 février au matin, la carte du temps montrait la fuite vers l'orient des trois cyclones de la veille et l'arrivée en Irlande du cyclone attendu ; de basses pressions sur la mer d'Irlande, 740^{mm}, de hautes pressions sur l'Algérie, 765^{mm}, la marche des vents sur le nord-ouest du continent, et en particulier les vents du sud-ouest qui régnaient sur toute la France, prouvaient l'existence d'un cyclone très étendu, peu intense, avec son centre sur les Iles britanniques. C'est sur les flancs de ce grand cyclone que s'est développé le cyclone secondaire, serré, de petite étendue, mais de puissante intensité et de grande vitesse de translation, qui a traversé notre pays. Vers midi, son centre atteignait la côte de France, près de Nantes ; à 1$^{h\ s}$ il était à Tours, à 9$^{h\ s}$ il passait sur Carlsruhe ; le 21 à 8$^{h\ m}$ il arrivait sur la Bohême. A supposer que sa trajectoire fût rectiligne, son centre aurait passé par Orléans, Troyes, Nancy, c'est-à-dire notablement plus au nord que la Suisse ; mais il paraît plus probable qu'il ait suivi une trajectoire incurvée, à concavité septentrionale, qui l'a rapproché de nous. En tous cas notre pays était dans la zone dangereuse du tourbillon. [2] Voici les faits qui ont caractérisé chez nous cette terrible tempête.

Le baromètre a signalé son arrivée par une baisse rapide et violente. A Lausanne, voici la marche du baromètre réduit à 0° :

20 février	7 00$^{h\ m}$	707.1^{mm}
—	1 00$^{h\ s}$	702.6
—	6 45	694.7
—	9 00	699.0
—	10 15	702.5
21 février	7 00$^{h\ m}$	705.4

Le baromètre de l'observatoire de Berne (rapporté à la normale) nous donne, d'heure en heure, la marche du phénomène :

(1) Voir les cartes du Bulletin quotidien international publiées par le bureau central météorologique de France.

(2) *R. Billwiller*. Der Sturm vom 20. Februar 1879. Schweiz. meteorol. Beobacht. XIV, xxi, année 1877, Zurich.

20 février	midi	—15.3mm	20 février	7 h s	—23.7mm
—	1 h s	—16.3	—	8	—23.7
—	2	—17.8	—	9	—23.3
—	3	—18.9	—	10	—21.7
—	4	—20.2	—	11	—19.0
—	5	—21.4	—	minuit	—16.6
—	6	—22.8	21 février	1 h m	—14.8

Par le fait des cyclones des jours précédents qui avaient passé au nord de la Suisse, le vent du sud régnait sur notre lac ; dans la journée du 20 février il se fit une accalmie presque complète, puis tout à coup, dans la soirée, le vent de S.-W. éclata avec une soudaineté et une intensité extraordinaires. En quelques minutes il atteignit son intensité maximale. Voici l'heure du début de l'ouragan, d'où l'on peut tirer la vitesse de translation du phénomène. ([1])

	Heure du début.	Distance de Genève.	Vitesse de translation par seconde.
Genève	5 35 h s		
Morges	6 35	45km	12m
Lausanne	6 45	51	12
Fribourg	8 10	102	12
Berne	8 50	129	11
Zurich	9 55	215	13.5

Cette vitesse de translation, ([2]) en somme très modérée, 12m par seconde, 43km à l'heure, ne correspond en rien aux effets désastreux du coup de vent. Celui-ci, sur le lac, a soulevé des vagues énormes, ([3]) a noyé onze pêcheurs savoyards de la Grande-Rive, dont les trois bateaux ont été se briser sur la côte de Vevey, a fortement endommagé le chemin de fer de Cully à St-Saphorin et causé le déraillement d'un train ; deux wagons sont tombés dans le lac et deux employés postaux ont été presque noyés ; sur terre, il a renversé des cheminées,

([1]) Bull. S. V. S. N., XVI, 477.

([2]) Cette vitesse de la propagation du coup de vent est très notablement inférieure à celle qui nous est donnée pour la translation du cyclone par les deux positions connues le 20 février, à 1 h. à Tours, à 9 h. à Carlsruhe. La distance entre ces deux villes étant de 600km, si l'on admet une marche rectiligne, cela représente une vitesse de translation de 21m par seconde ; si l'on admet une marche curviligne, la vitesse eût été encore plus forte. Je ne sais comment expliquer cette divergence entre les deux procédés de calcul qui nous amènent à des résultats variant du simple au double.

([3]) J'en ai mesuré le rythme à Morges, à 10h du soir ; elles avaient 5 à 6 secondes de durée.

enlevé des toitures, emporté par milliers les tuiles et ardoises; il a renversé des forêts entières, tellement que les forestiers ont pu évaluer à 570 000 ^{m3} de bois les arbres renversés par l'ouragan.

L'anémomètre de l'observatoire de Berne a enregistré les vitesses suivantes :

20 février de	5 à 6 $^{h\,s}$	0.0^{m}	par	seconde	
—	» 6 » 7	0.8	»	»	
—	» 7 » 8	1.5	»	»	
—	» 8 » 9	20.0	»	»	
—	» 9 » 10	22.0	»	»	
—	» 10 » 11	23.2	»	»	soit 83.5 ^{km} à l'heure.
—	» 11 » 12	22.4	»	»	

La vitesse du vent, très supérieure à celle du mouvement de translation du phénomène, prouve qu'il y a eu là un mouvement tournant, tourbillonnant de l'atmosphère, un véritable cyclone. La violence du vent, à en juger par les dégâts dans les forêts, a été presque égale à celle du tornado du 19 août 1890 dans le Jura vaudois, quoique, dans ce dernier, le diamètre moins étendu du tourbillon, 300 à 1000^{m} seulement, ait concentré tous les ravages mécaniques dans une zone beaucoup plus resserrée.

L'ouragan du 20 février a suivi la plaine suisse de Bellegarde à Berne, à Zurich, où il est arrivé à 10 $^{h\,s}$, et au lac de Constance. Un vent de tempête a bien été signalé à Chambéry, à Lyon, à Mâcon, dans le Jura neuchâtelois et bernois, mais nulle part il n'a eu l'intensité qu'il a montrée entre Genève et Fribourg. La largeur du tourbillon était fort grande, 10 à 15^{km} au moins dans sa partie désastreuse. Le bord externe de la tempête sur le lac a été Evian et Vevey; dans le Valais il soufflait une vaudaire, soit le vent du S.-E.; de l'autre côté des Alpes régnait le calme.

J'ai cru devoir donner cette description typique d'un ouragan-cyclone. Quant à l'orage ordinaire, il est si banal qu'il est inutile d'en donner un exemple.

Quelle que soit la nature essentielle de l'orage et la cause de son développement, le phénomène est toujours caractérisé, entr'autres, par un coup de vent plus ou moins violent ; c'est le point qui nous intéresse ici.

Le vent d'orage souffle de toutes les directions ; l'orage cependant,

se développant en général sur les sommets, se dirige ordinairement de la montagne vers le lac. Suivant la direction et la localité, le vent d'orage porte, dans notre vallée, les noms de :

Vaudaire	dans la vallée du Rhône en descendant ;
Joran	venant du Jura, direction N.-W.;
Molan	» de la vallée de l'Arve ;
Bornan	» » » » » la Drance.

Voici d'après les résumés de MM. E. Plantamour et R. Billwiller le nombre moyen des orages, avec phénomènes électriques, dans trois stations de notre vallée :

	Genève. 1846-75	*Lausanne.* 1874-86	*Aigle.* 1881-90
décembre	0.1	0.0	0.1
janvier	0.2	0.0	0.1
février	0.1	0.2	0.0
mars	0.2	0.4	0.1
avril	1.2	0.9	0.2
mai	4.0	2.6	1.8
juin	5.3	6.4	4.9
juillet	5.5	6.8	9.0
août	4.9	6.2	5.8
septembre	2.5	2.5	2.3
octobre	0.8	0.5	1.1
novembre	0.2	0.2	0.1
hiver	0.4	0.2	0.2
printemps	5.4	3.9	2.1
été	15.7	19.4	19.7
automne	3.5	3.2	3.5
année	24.9	26.7	25.5

Tableau général des vents.

Après avoir ainsi séparé dans un essai théorique les trois classes de vents qui soufflent sur le lac, brises, vents généraux, vents d'orage, revenons à l'observation et cherchons comment les courants d'air se répartissent dans notre vallée, quelle est, dans les principales stations, la direction prédominante du vent.

Pour cela, nous avons encore recours à l'obligeance infatigable de notre ami, le savant directeur de l'Institut central de météorologie à Zurich. M. R. Billwiller a bien voulu dépouiller les observations ané-

mométriques de quatre stations, à savoir Genève 1864-1880, Morges 1864-66, Lausanne (Asile des aveugles) 1881-86, Vernex-Montreux 1864-72, et les présenter dans un tableau synoptique, en les ordonnant en tant pour cent, d'après les demi-quadrants de la rose des vents. Dans les diverses stations, l'on a pris au moins trois fois par jour la direction du vent, sans tenir compte de son intensité ou de la nature du courant d'air. C'est donc la direction de la girouette qui est indiquée par ce tableau, quand il y a courant d'air.

Mais ce qui rend fort difficile l'utilisation du tableau, c'est l'intervention de la rubrique du calme ; l'appréciation du calme est évidemment très personnelle à l'observateur ; l'un appelle calme ce qui, pour un autre, est une légère brise. Puis, il y a la situation de la station, plus ou moins abritée, plus ou moins ventée. C'est ainsi que la girouette de l'observatoire de Genève, au sommet d'une colline, entre la vallée de l'Arve et le lac, ne perd pas un souffle d'air et qu'elle est toujours en mouvement, alors que le calme plat peut régner sur le lac, à ses pieds. Morges est sur le chemin des brises lacustres, et le morget et le rebat soufflent au fond de son golfe plus que partout ailleurs. L'asile des aveugles de Lausanne, où les observations ont été faites jusqu'en 1886, est une station bien exposée au vent, mais elle est assez éloignée du lac, et assez haut en-dessus de lui, pour échapper presque absolument aux brises lacustres. Quant à Montreux, niché dans sa cachette abritée contre tous les vents, sauf le vent sudois, il jouit d'un repos admirable de l'air; souvent, tandis que la bise fait rage sur tout le Léman occidental, le lac n'y est pas même ridé. La côte de Montreux est, au point de vue du calme, dans une situation trop protégée pour que ses observations donnent une juste idée de l'agitation de l'air sur le Haut-lac. Une girouette placée dans la plaine du Rhône donnerait de tout autres résultats.

La signification du calme anémométrique est donc fort variable d'une station à l'autre. Cela n'aurait pas grand inconvénient si cette valeur n'influait pas sur les autres chiffres du tableau. Mais, quand une rubrique peut varier dans les limites de 3 % à Genève à 90 % à Montreux, on comprend que tous les autres chiffres en soient considérablement affectés et que la comparaison soit difficile. (1)

(1) Le résumé de l'année météorologique 1890 de Genève, que M. A. Kammermann vient de publier (Archives de Genève XXVI, 404, 1891) justifie les réflexions ci-dessus. En utilisant pour l'appréciation de la force du vent les données de l'ané-

Quoi qu'il en soit voici le tableau de M. Billwiller, en tant pour cent, rapporté à 3 observations par jour :

	Genève.	Morges.	Lausanne.	Montreux.
N.	21.4	19.2	0.5	2.0
N.-E.	11.5	5.9	21.1	1.3
E.	4.7	0.1	0.5	0.6
S.-E.	5.3	0.1	1.6	1.4
S.	21.6	0.6	0.5	0.4
S.-W.	23.4	9.7	22.0	0.2
W.	5.2	2.4	1.0	1.0
N.-W.	4.0	0.5	3.8	3.0
Calme	2.9	61.5	49.2	90.1

Ce qui ressort le plus évidemment de ce tableau, c'est la proportion des calmes qui serait, avec la réserve des points que j'ai indiqués :

à Genève	3	pour cent	des observations,
à Lausanne	49	»	»
à Morges	61	»	»
à Montreux	90	»	»

En second lieu, la direction dominante des courants d'air serait :

à Genève les vents du S. et S.-W., du N. et N.-E., soit les vents parallèles à la vallée du Petit-lac ;

à Morges les vents du N. et N.-E., du S.-W. et W., soit d'une part les vents parallèles à la plaine suisse, soit d'autre part les vents perpendiculaires à la côte ;

à Lausanne, prédominance énorme des vents du N.-E. et S.-W., soit les vents longitudinaux de la plaine suisse qui sont en même temps perpendiculaires à la côte ;

à Montreux enfin, les vents dominants sont ceux du N.-W. et du S.-E., soit les vents parallèles à la vallée du Haut-lac.

momètre Richard, installé récemment à l'observatoire, les météorologistes de Genève ont, pendant cette année, fait entrer dans la rubrique du calme tout courant d'air dont la vitesse était inférieure à 0.5^{m} par seconde, ce qui correspond au degré 0 de la 1/2 échelle Beaufort employée dans les observatoires suisses. Il en résulte que, pour cette année, le nombre des calmes s'est élevé à 29.6 pour cent observations, donnant un écart de 23.9 % sur la moyenne des 29 années normales 1847-75, qui est de 5.7 %. Pour cette année, le chiffre de 30 % de calmes se rapproche donc, sans les atteindre il est vrai, des valeurs indiquées pour les autres stations de la région du Léman.

VI. **Le temps qu'il fait.**

Qu'elle est pauvre notre belle et chère langue française, qui nous impose une aussi pitoyable association de mots pour exprimer fort mal ce que les autres langages savent formuler en un seul terme! Quand apparaîtra-t-il, le novateur qui aura l'audace de nous doter d'un mot pour traduire ce que l'anglais appelle *the weather*, l'allemand *das Wetter* ou *die Witterung*, etc.? Nous en attendons la venue avec une légitime impatience. Je voudrais bien pour mon compte pouvoir utiliser le mot température qui, dans son ancienne acception, signifiait précisément le temps qu'il fait. Mais, malgré l'essai qui en a été tenté de divers côtés, je ne puis m'y décider, la signification moderne de ce terme s'appliquant trop généralement à la chaleur : « température des eaux », « température de l'air ». Le meilleur mot serait, à notre avis, temps météorologique, mais il est bien long, bien lourd, et bien... pédant!

Le temps, suivant qu'il est beau ou mauvais, est l'un des éléments majeurs des jouissances ou des désagréments de la vie individuelle et de la vie sociale. Quels sont les facteurs qui, dans notre pays, déterminent le caractère du temps météorologique? c'est ce que je voudrais exposer rapidement.

Et d'abord quelques définitions :

Le temps est beau quand le soleil brille dans un ciel serein, que l'air est au calme ou agité seulement par des brises locales.

Le temps est médiocre, ou bien si par le calme le ciel est voilé de nuages, ou bien si avec un ciel serein l'air est agité par un grand vent.

Le temps est mauvais quand la pluie et le vent additionnent leurs incommodités.

Le temps est stable quand les mêmes conditions météorologiques persistent pendant plusieurs jours de suite; il est variable quand diverses circonstances météorologiques se succèdent rapidement en alternant entr'elles.

On peut, dans nos latitudes moyennes septentrionales, et spécialement dans notre pays du Léman, établir quelques règles météorologiques générales :

1° La partie de l'atmosphère qui nous surmonte peut présenter trois états différents :

a. Ou bien elle est immobile, aucun cyclone rapproché ne la mettant en perturbation. Appelons cet état le régime du calme.

b. Ou bien elle est dans le régime du cyclone lorsqu'un de ces tourbillons traverse notre région ou les pays avoisinants, et fait baisser la pression atmosphérique en déterminant un mouvement spirale centripète, des couches inférieures de l'air, en rotation de droite à gauche.

c. Ou bien elle est dans le régime de l'anticyclone lorsque plusieurs cyclones distants refoulent l'air dans l'espace qui les sépare ; dans l'anticyclone il y a élévation de la pression atmosphérique, et si à la périphérie il y a mouvement de l'air, il présente, dans ses couches inférieures, une tendance souvent mal marquée à une rotation divergente de gauche à droite autour du centre.

2° Le régime du calme nous donne ordinairement le beau temps. Le cyclone est une perturbation qui occasionne les vents généraux et, suivant les circonstances, peut nous amener le mauvais temps ou le temps médiocre. L'anticyclone est le régime du beau temps ; il peut cependant, sur ses bords, déterminer des vents généraux, moins intenses il est vrai que ceux du cyclone, et nous donner alors un temps médiocre.

3° Nous avons dit que les cyclones sont le phénomène actif des perturbations atmosphériques de grandes allures ; ils se meuvent le plus souvent du sud-ouest vers le nord-est ; c'est donc du côté de l'Atlantique que nous, habitants du centre de l'Europe, devons chercher les indices du temps prochain. Cette direction générale présente cependant quelques anomalies et exceptions ; parfois les cyclones suivent les parallèles du globe terrestre, parfois on les voit s'infléchir vers le sud, parfois se redresser en suivant les méridiens ; on a même vu des cyclones présenter dans une partie de leur trajet une marche rétrograde ; de là l'incertitude des prévisions météorologiques, même à brève échéance.

4° Quand nous sommes dans le régime du calme, nous avons le beau temps assuré ; celui-ci durera jusqu'à ce qu'un cyclone vienne étendre sa perturbation chez nous. L'air, dans le régime du calme, n'est agité que par les brises locales, brises montagnardes et brises

lacustres à périodicité régulière, brises lacustres non périodiques, causées les unes et les autres par les inégalités d'action sur les couches atmosphériques de sols terrestres ou aquatiques de températures différentes ou variables. (1)

Notons ici l'apparition, pendant la saison chaude, de l'orage local qui se développe par suite de l'ascension rapide des masses d'air surchauffé au contact d'un sol brûlant, ascension qui est accompagnée de condensation des vapeurs; orage local qui avorte ou qui éclate, qui se reproduit périodiquement à la fin de chaque journée, mais qui n'est qu'un accident, qu'un intermède dans la série des jours de beau temps. (2)

Notons encore, pendant la saison froide, les brouillards de Genève et les nuages bas du Grand-lac, dont la nappe attristante voile trop souvent le ciel de notre plaine subalpine suisse, tandis que la région des Alpes et les sommités du Jura jouissent du soleil radieux du grand beau temps d'hiver. (3)

5° Quand nous sommes dans le régime de l'anticyclone qui se reconnaît par l'état de hausse extrême du baromètre, nous sommes en possession du beau temps, sec et froid. Mais ce beau temps est généralement moins sûr et moins persistant que le beau temps du régime du calme; en effet, l'anticyclone est dû, si notre interprétation est juste, à une action éloignée de plusieurs cyclones; il y a donc menace de perturbations possibles, si l'un ou l'autre de ces cyclones venait à se rapprocher; nous sommes exposés à être entraînés dans son aire de troubles atmosphériques. Cependant, et cela surtout dans la saison d'hiver, nous voyons parfois l'anticyclone rester stationnaire pendant des jours, des semaines sur le centre de l'Europe, et spécialement sur le massif des Alpes. Il semble alors que les cyclones se séparent en deux groupes, l'un suivant l'Atlantique du nord, l'autre la Méditerranée et l'Algérie, qui laissent, entre ces deux routes agitées par les tourmentes, comme un îlot ou un promontoire de calme et de hautes pressions atmosphériques, lesquelles nous assurent le beau temps. Exemples : décembre 1879, hiver 1890-91.

Dans l'anticyclone, il y a tendance à l'établissement de vents généraux, divergeant centrifugalement, avec indication d'une rotation spé-

(1) Voir page 302.
(2) Voir page 330.
(3) Voir page 208.

ciale de gauche à droite. Ils sont du reste mal marqués et ne deviennent évidents que lorsque l'action plus efficace d'un cyclone voisin vient en renforcer l'intensité.

6° L'approche d'un cyclone nous est indiquée par la baisse du baromètre au-dessous de la moyenne. Plus le cyclone est puissant, plus la baisse barométrique est forte au centre du tourbillon. Toutes choses égales dans la puissance du cyclone, plus la baisse barométrique est forte, plus nous sommes rapprochés du centre du tourbillon. L'effet d'un cyclone est différent suivant que son centre passe au nord ou au sud de notre pays, ou bien le traverse directement.

7° Un cyclone dont le centre passe sur notre pays amène les plus graves perturbations. Une baisse barométrique maximale est accompagnée de vents du sud ou sud-ouest, de toute intensité, avec grandes chutes de pluie; quand le baromètre est au minimum, surviennent des sautes de vent plus ou moins violentes, irrégulières, désordonnées; puis passage aux vents du nord pendant que le baromètre remonte rapidement. Le cas est peu fréquent; il est très rare que le centre d'un cyclone traverse notre vallée, mais quand il nous frappe, c'est le temps des grandes tempêtes. L'ouragan du 20 février 1879 en est un exemple; son intensité fut extrême, car toute sa puissance était concentrée sur une aire relativement peu large.

8° Un cyclone, dont le centre passe au nord de nous, nous amène les grands vents du sud, et cela avec d'autant plus d'intensité et de durée que, le centre étant plus rapproché, la corde tracée par notre station, immobile sur l'aire de son cercle en mouvement, est plus longue. Pendant toute la durée de la baisse barométrique, c'est le sudois qui domine; pendant le minimum barométrique, c'est le joran; pendant la hausse du baromètre, c'est la bise.

A quelle distance un cyclone fait-il sentir son action? Cela dépend naturellement de sa puissance, de l'intensité de la dépression atmosphérique, de l'étendue de l'aire de dépression. Je ne fais pas grande erreur si je dis qu'en général un cyclone qui passe sur l'Ecosse n'a point d'action dans notre vallée; un cyclone dont le centre passe sur le nord de l'Angleterre occasionne chez nous quelques bouffées de vent sudois; un cyclone qui passe sur la Manche et la Belgique agit puissamment, et nous amène le grand mauvais temps; ceux dont le centre est encore plus rapproché, déploient leurs effets désastreux dans toute leur énergie. Si je traduis ces évaluations en chiffres, je

dirai qu'un cyclone d'intensité moyenne qui passe à 1500km de nous ne nous touche pas; s'il passe à 1000km il commence à faire sentir ses effets, à 500km il agit efficacement; à moins de 500km il est d'action puissante, désastreuse.

9° Si le cyclone passe au sud de notre pays, nous pouvons, selon les circonstances, avoir deux sortes de temps; ou bien la bise, ou bien le calme. Cela dépend du rapport entre la vitesse de rotation des ondes aériennes, qui nous atteignent, et la vitesse de translation du cyclone. Nous sommes en effet dans le côté maniable du tourbillon, dans la région où la vitesse de translation du sud-ouest vers le nord-est tend à neutraliser le retour en arrière de l'air tourbillonnant qui cherche à revenir du nord-est au sud-ouest. Si ces deux vitesses sont égales, nous avons le calme; si, ce qui est le plus fréquent, la vitesse de rotation est plus forte que la vitesse de translation, nous avons la bise. Ainsi donc, baisse du baromètre soit avec le calme, soit avec la bise, c'est l'indice d'un cyclone passant dans les contrées méridionales, soit le sud de la France et le Piémont, soit le golfe du Lion et le golfe de Gênes, soit la Méditerranée.

10° La vitesse de déplacement ou de translation d'un cyclone est en général telle que nous sommes pendant deux ou trois jours sous son influence; de là, la durée moyenne du mauvais temps.

11° Les cyclones se succèdent fréquemment sur la même trajectoire, ou à peu près, à quelques jours d'intervalle. De là, la persistance et la réapparition à courte échéance du mauvais temps dans certaines saisons désastreuses des années de misère.

12° Dans des conditions encore mal définies, il semble que le quadrant sud-oriental des cyclones de grande extension et de faible puissance présente parfois le développement de cyclones accessoires, de petit diamètre, mais de grande intensité. Ce sont les tornados, ou ouragans-cyclones qui viennent, heureusement fort rarement, traverser nos contrées et semer la ruine sur leur trajectoire. Nous en avons cité un exemple dans l'ouragan du 20 février 1879.

— Les cartes météorologiques que les observatoires publient en édition journalière, et mettent libéralement à la disposition des intéressés, démontrent les relations que nous venons d'esquisser entre le temps qu'il fait et la distribution de la pression atmosphérique sur le continent. Celui qui étudie ces cartes avec un peu d'attention et de persévérance arrive bientôt à en tirer, non pas des prophéties à longue

échéance sur le temps de l'avenir, mais au moins des probabilités pour le temps de demain, et certainement l'explication du temps de la journée et de la veille. Je ne puis assez recommander au grand public l'étude de ces précieux documents [1] qui nous aident à comprendre les faits intéressants, et qui nous touchent de si près, de la météorologie locale et générale.

(1) Bulletin du bureau central météorologique suisse à Zurich. Feuille quotidienne. Prix de l'abonnement annuel, 12 fr.

CINQUIÈME PARTIE

HYDROLOGIE

Cette partie de notre livre doit traiter du régime des eaux du Léman, soit des variations de hauteur de sa nappe. Pour l'étudier, nous le décomposerons en chapitres, à savoir :

1° Le bassin d'alimentation du Léman.
2° Les petits affluents du lac.
3° Le Rhône du Valais.
4° L'émissaire du lac, le Rhône de Genève.
5° La limnimétrie du Léman.

I. Le bassin d'alimentation du Léman.

La terre ferme dont les eaux se versent dans le Léman comprend :

1° Le canton du Valais, 5247$^{km^2}$, moins la vallée du Simplon (145$^{km^2}$) dont les eaux s'écoulent dans la Doveria, affluent du Pô, et le versant nord du Grammont, communes de St-Gingolph et du Bouveret (15$^{km^2}$), dont les eaux sont affluents directs du lac.

2° La vallée de la Vallorcine, canton de Chamonix (Haute-Savoie), de 40$^{km^2}$ environ, dont les eaux s'écoulent dans le Trient.

3° Les Alpes vaudoises, dont les eaux se versent dans le Rhône par l'Avençon, la Grionne et la Grande-Eau. Leur superficie est d'environ 330$^{km^2}$.

4° Une partie du pays bas du canton de Vaud, de Fribourg, du flanc oriental du Jura, du canton de Genève et du Pays de Gex, qui

envoient leurs affluents dans le lac sur sa rive nord. Environ 1170^{km2}.

5° Les communes valaisannes du Bouveret et de St-Gingolph, 15^{km2}.

6° Le Chablais tout entier, dont les eaux se versent directement dans le lac sur sa rive gauche. Environ 860^{km2}.

En additionnant ces chiffres, j'arrive pour le bassin d'alimentation du lac à un total de 7502^{km2}.

D'après les chiffres de la commission hydrométrique suisse, le bassin hydrographique total du lac en amont de Genève étant de 7994.5^{km2}, si j'en retranche la superficie du lac, 582.4^{km2}, il reste pour le bassin d'alimentation lui-même, 7412.1^{km2}, soit 80^{km2} de moins que ne donne le calcul ci-dessus. J'adopterai de préférence le chiffre de la commission hydrométrique.

Le lac n'est en superficie que la 1 : 12.8 partie du bassin d'alimentation fourni par la terre ferme, ou le 1 : 13.7 du bassin total de 7994.5^{km2} dont les eaux s'écoulent à Genève.

Les 8000^{km2} du bassin d'alimentation peuvent être divisés en zones suivant leur altitude. Une mesure approximative que j'ai faite en 1882, d'après la carte hypsométrique suisse au 1 : 500 000e, m'a donné les chiffres suivants :

Le lac Léman			582^{km2}
Le bassin d'alimentation de	375 à 500^{m}	d'altitude	650
»	500 à 1000^{m}	»	1210
»	1000 à 1500^{m}	»	1060
»	1500 à 2000^{m}	»	1350
Au-dessus de	2000^{m} d'altitude		3150

En y comprenant la nappe du Léman, cela donne une altitude moyenne de 1944^{m}.

Le nombre des glaciers qui se trouvent dans le bassin d'alimentation du Léman est considérable. Sur le catalogue de Siegfried (1) j'en ai compté 284. Dans l'étude qu'a faite en 1866 la commission hydrométrique suisse, (2) elle en a reconnu 257. Quant à leur superficie, elle

(1) *J.-J. Siegfried.* Les glaciers de la Suisse, rangés par régions et par groupes Zurich 1874.

(2) Nomenclature provisoire des glaciers du réseau limnimétrique suisse, dressée par la commission hydrométrique en 1866. Ce tableau lithographié n'a pas encore été publié en édition définitive. La partie qui traite des glaciers du bassin du Rhône, et qui donne la superficie détaillée de 61 glaciers ayant plus de 4^{km2}, et en un bloc la superficie totale de 196 petits glaciers, a été reproduite par M. Ch. Dufour, président de la commission hydrométrique, dans le Bulletin S. V. S. N., X, 663, 1870.

s'élève à environ 1000^{km^2}. Cette superficie des glaciers a été mesurée en 1866 par la commission hydrométrique suisse et évaluée à 1037.3^{km^2} pour le bassin du Rhône valaisan ; les affluents directs du lac n'ayant point de glaciers à leur source, ce chiffre peut être attribué à l'ensemble du bassin hydrographique du Léman. Mais cette mesure ayant été tirée de la carte fédérale suisse, dont les levés originaux ont été faits de 1839 à 1860, pendant une phase de crue générale des glaciers, ce chiffre est trop élevé pour une moyenne. Dans une révision des levers au $50\,000^e$, opérée de 1871 à 1880, en phase de décrue générale, on a trouvé (1) pour 19 feuilles du Valais (l'atlas Siegfried dessine le Valais sur 27 feuilles) une diminution de superficie de 53.86^{km^2}. C'est donc à moins de 1000^{km^2}, peut-être à 950^{km^2} qu'il faut fixer la superficie des glaciers du Rhône en phase de décrue générale ; comme chiffre moyen, on peut adopter, me semble-t-il, environ 1000^{km^2} pour la superficie des glaciers et neiges éternelles qui, dans la période géologique actuelle, versent leurs eaux dans le Léman.

La superficie du bassin d'alimentation du lac étant de 7994.5^{km^2} est égale à l'aire d'un cercle de 50.45^{km} de rayon. Si le centre de ce cercle était placé au centre de figure du lac, sa circonférence passerait à peu près à Pontarlier, Concise, Estavayer, Payerne, Bulle, Rougemont, Ormonts-dessus, Anzeindaz, Vernayaz, le Buet, Sallanches, Thorens, Cruseilles, Chancy, St-Claude, St-Laurent, Nozeroi, Pontarlier.

Le bassin d'alimentation du Léman est borné au nord et au nord-ouest par le bassin de l'Aar, affluent du Rhin ; à l'ouest par le bassin du Doubs, affluent de la Saône, et par quelques ruisseaux affluents du Rhône en aval de Genève ; à l'est par le bassin de la Reuss, affluent du Rhin ; au sud par divers affluents du Pô, et par l'Arve, affluent du Rhône en aval de Genève. Sur le plateau qui domine La Vaux, la ligne de partage des eaux descend tellement au sud, que le bassin du Rhin n'est distant que de 2.5^{km} des rives du lac à la Tour de Gourze, au-dessus de Cully, et même à 2^{km} sur les flancs du mont Pèlerin, au-dessus de Corseaux.

Ce bassin d'alimentation envoie ses eaux au Léman, d'une part par le Rhône, le principal affluent du lac, d'autre part par une vingtaine de rivières et un grand nombre de ruisseaux que nous appellerons les p e t i t s a f f l u e n t s d u l a c. Commençons par ces derniers.

(1) *F.-A. Forel.* Les variations périodiques des glaciers des Alpes, IIIe rapport. Jahrbuch des schw. Alpen-Club, XVIII. 262. Bern 1883.

II. **Petits affluents du lac.**

La superficie totale du bassin d'alimentation des petits affluents du Léman est de 2034^{km2} qui se répartissent comme suit :

Rive nord, ou rive droite, ou côte suisse	1173^{km2}
Rive sud, ou rive gauche, ou côte savoyarde	861 »

Les rivières qui se jettent directement dans le lac sont :

Sur la rive droite : L'Eau-froide, qui prend sa source au col d'Ayerne entre les Tours d'Aï et Malatrait, passe à Roche et entre dans le lac au sud de Villeneuve.

La Tinière prend sa source au col de Chaude, et entre dans le lac au nord de Villeneuve.

La Veraye a sa source entre Naye et la dent de Merdasson et son embouchure à Veytaux.

La baye de Montreux (¹) prend sa source à la Cape de Moine et traverse le village de Montreux pour se jeter dans le lac.

La baye de Clarens a ses sources soit au mont Folly soit à l'Alliaz, et se jette dans le lac entre Clarens et Burier. Elle divaguait autrefois dans un large lit torrentiel. Une inondation désastreuse eut lieu en 1726. Divers travaux d'endiguement furent successivement emportés par les crues du torrent; les travaux dirigés par Venetz en 1834 furent détruits par l'inondation de 1846. Les digues actuelles, construites de 1847 à 1852, sous la direction de J.-J. de la Rottaz, ont résisté à tous les assauts de la rivière.

La Veveyse recueille les eaux du versant occidental de la Cape de Moine, la Dent de Lys, la Tremettaz, et aussi du Niremont; elle se jette dans le lac à Vevey. C'était autrefois un torrent incommode et dangereux. De grandes inondations, le 12 juillet 1701 et le 6 juillet 1726, provoquèrent des travaux de contention. Mais l'endiguement définitif et rationnel n'a été commencé qu'en 1883, sous la direction de M. l'ingénieur cantonal L. Gonin; on peut espérer que le torrent est définitivement dompté.

(¹) Ce mot de baye, qui est appliqué aux torrents du pays de Montreux, vient évidemment du mot patois de bai, bief, ruisseau. L'orthographe locale est celle que je donne et non baie comme l'écrit la carte Dufour. La carte Siegfried écrit Bey pour le ruisseau de Noville.

Sur les flancs de La Vaux, plusieurs ruisseaux amènent les eaux dans le lac; quelques-uns seulement méritent d'être nommés: le Flon, qui par son affluent le Forestay[1] vient du lac de Bret et aboutit à Rivaz, la Gérine, qui passe à Cully, la Lutrive à Lutry, la Paudèze à Paudex.

Le Flon a ses sources dans les communes d'Epalinges et du Mont et traverse Lausanne pour se jeter dans le lac à 2km à l'ouest d'Ouchy. Le Flon a eu de graves crues d'inondation en 1555, le 9 juillet 1778, le 4 septembre 1832, le 3 octobre 1888 et le 2 juin 1889. On s'occupe actuellement à l'endiguer et à le dompter.

La Tsamberonne, la Sorge et la Mexbre drainent le pays de Cheseaux, Romanel, Crissier, Ecublens et entrent dans le lac à Dorigny sous Lausanne.

La Venoge[2] est le plus considérable des affluents de la rive nord du lac. Sa source officielle sort du flanc du Jura, en fontaine vauclusienne, près du village de l'Isle, mais son affluent principal, le Veyron, a un cours beaucoup plus long et commence près de Bière. Le Veyron et la Venoge marchent longtemps parallèlement au pied du Jura dans la direction du N.-E., comme s'ils allaient se verser dans le lac de Neuchâtel, soutenus probablement par des moraines frontales de l'ancien glacier du Rhône. Mais arrivés à La Sarraz, ils semblent se butter contre la klippe jurassique du Mortmont en se détournant à l'est d'abord puis au sud, et la rivière vient se jeter dans le Léman à 3km à l'est de Morges, à l'extrémité d'un cap mollassique. A La Sarraz, se trouve un fait géographique intéressant. Un des affluents de la Thièle, rivière qui appartient au bassin du Rhin et se jette dans le lac de Neuchâtel, le Nozon, se divise au moulin Bornu, à Pompaples, en deux bras, dont l'un suit le cours normal vers le nord, l'autre va se déverser dans la Venoge. Je tiens cette division du ruisseau entre deux grands bassins

(1) Le Forestay, qui sort du lac de Bret, a perdu toute importance depuis que les eaux de ce petit lac ont été captées pour l'alimentation des villes de Lausanne et de Morges. Mais il présente un fait hydrographique à noter. Le bassin de réception du lac de Bret n'étant pas suffisant pour fournir la masse d'eau nécessaire à Lausanne, on y a subvenu en creusant un tunnel à travers la ligne de partage des eaux en allant chercher dans le Grenet, affluent de la Broie, le trop plein des eaux de forte crue. Par ce procédé, une certaine quantité d'eau appartenant originairement au bassin du Rhin est déversée artificiellement dans celui du Rhône. Cette quantité est du reste peu considérable.

(2) C'est au bassin de la Venoge qu'appartient tout le flanc du Jura, depuis Lapraz jusqu'à Berolles, sur une longueur de plus de 16km.

hydrographiques pour artificielle et non naturelle; mais il y a, par ce canal, communication possible à travers la ligne de partage du Rhin et du Rhône, et cette communication nous servira à expliquer la présence dans le Léman de quelques poissons (l'anguille en particulier) dont les migrations ne peuvent guère se faire que par ce point.

La Morge prend ses sources près de Pampigny et dans la forêt de Ferman, pour se jeter dans le lac à Morges.

Le Boiron vient du moulin de la Gollie, près de Ballens, et entre dans le lac entre Morges et St-Prex, en traversant, à son embouchure, des terrasses anciennes, remarquables par leur développement et leur régularité.

L'Aubonne, dont les sources vont se chercher fort haut dans le Jura, dans les montagnes de St-Georges, et qui draine le flanc du Jura, de Berolles à Longirod, sur une longueur de 8^{km}, descend dans un ravin large et profond au nord de la ville d'Aubonne, et se jette dans le lac, près d'Allaman, à l'extrémité d'un large delta torrentiel, l'un des plus grands du lac.

D'Aubonne à Gland, les gradins de La Côte donnent naissance à quelques ruisseaux, la Gordanne, le Rupalet, la Dullive; aucun d'eux ne mérite le titre de rivière.

La Promenthouse, qui prend ses sources en divers points du flanc du Jura, entre St-Georges et la Dôle, vient se jeter dans le lac au bout de la belle pointe d'alluvion qui ferme, du côté suisse, l'extrémité du Grand-lac.

L'Asse, le Corjon, le Boiron (de Nyon), ce dernier venant du Jura, dans les bois de la Rippe, le Riond, le canal de Crans, le Brassus, le Greny, le Torry, le nant de Braille, tels sont les ruisseaux d'importance diverse qui se versent ensuite dans le lac.

La Versoie a plus d'importance; elle prend ses sources dans le Jura, sert d'écoulement au pays de Gex et de Divonne, et se verse dans le lac en traversant le bourg de Versoix.

Entre Versoix et Genève, il n'y a plus à mentionner que le nant du Vangeron, qui vient de Fernex et même plus haut.

Sur la rive gauche. La Morge (de St-Gingolph) vient du flanc occidental de la dent d'Oche, par le creux de Novel et se verse dans le lac à St-Gingolph, où elle fait la limite entre la Suisse et la France.

De St-Gingolph à la Drance, une série de petits ruisseaux qui ne sont pas même nommés sur la carte de l'Etat-major français, drainent

la face nord, fort étroite il est vrai, de la côte très raide qui regarde le lac.

La Drance est le principal affluent direct du lac; c'est une vraie rivière, rivière alpine, car elle reçoit les eaux de grandes vallées, mais non rivière glaciaire, car elle n'a aucun glacier dans ses sources. Elle est formée par trois affluents principaux, la Drance d'Abondance, la Drance du Biot et le Brevon de Bellevaux; après le confluent de ces trois rivières, la Drance traverse, dans un profond ravin, les alluvions anciennes que nous avons décrites page 172, et va se verser dans le lac, où elle a formé l'énorme delta qui fait la saillie la plus importante du Léman. Nous avons dit qu'il s'avance de 2^{km} sur la ligne des côtes et qu'il mesure 10^{km^2} de superficie. La superficie du bassin de la Drance est de 345^{km^2}.

Le ruisseau de Plamphiot récolte, en contournant la colline des Allinges, l'eau du versant nord du mont d'Armonnaz, et se jette dans le lac à Corzent.

Au fond du golfe de Coudrée, aboutissent le Redon, le Foron et le Vion, les deux premiers, qui drainent le pays entre les Allinges et le mont de Boisy, le troisième, le versant septentrional de cette colline.

De la pointe d'Yvoire à Genève, on trouve quelques ruisseaux, dont deux seulement sont nommés sur la carte, le nant des Pâquis, près de Messery, l'Hermance, qui traverse le bourg du même nom; c'est le plus considérable des affluents de ce quartier.

Je donnerai une idée suffisante de l'importance de ces divers affluents, en réunissant dans un tableau, pour les principaux d'entre eux, les trois valeurs suivantes :

a La longueur.

b La superficie du bassin de réception; cette valeur permet d'établir le débit probable de l'affluent.

c La pente moyenne depuis la source jusqu'à l'embouchure, valeur qui indique la puissance relative du transport en temps de crue.

J'y ajoute les valeurs analogues du Rhône comme termes de comparaison.

	Longueur ^{km}	Superficie. $^{km^2}$	Pente en tant pour cent.
Rive droite.			
Eau-froide	11	30	10
Tinière	5.5	17	24

	Longueur. km	Superficie. km²	Pente en tant pour cent.
Rive droite.			
Veraye	4.2	10	33
Baye de Montreux	7.7	20	20
Baye de Clarens	7	17	12
Veveyse	14	67	6
Paudèze	8.5	17	6
Flon	9.5	27	5
Venoge	41	265	0.7
Morge	11	40	2
Boiron	12	35	2
Aubonne	13	102	2.3
Promenthouse	12	105	5
Versoie	17	62	1
Rive gauche.			
Morge (St-Gingolph)	8	22	15
Drance	38	545	4
R. de Pamphiot	10	45	6
Redon	11	42	3
Foron	12	47	3
Vion	7	32	2
Hermance	10	45	1.5
Rhône	140	5380	0.9

En analysant et en groupant les valeurs de ce tableau, je puis tirer les faits suivants :

1° L'Eau-froide, la Tinière, la Veraye, les bayes de Montreux et de Clarens, la Morge de St-Gingolph, sont des torrents de montagne, à très petit bassin de réception, mais à très forte pente. Ces ruisseaux ont donc un débit moyen très faible; mais en crue d'orage ils doivent charrier un fort bagage de gros matériaux. Ajoutons qu'ils sont dans la partie du pays où les précipitations aqueuses sont le plus abondantes, où la hauteur de la pluie annuelle et des pluies d'orage est la plus considérable. Ce sont des torrents à grand pouvoir dévastateur.

2° La Veveyse, la Paudèze, le Flon, la Promenthouse, ont une pente de valeur moyenne; leur transport en temps de crue peut être encore considérable, surtout la Veveyse et la Promenthouse, dont le bassin de réception est étendu.

3° La Drance a un bassin énorme; son volume d'eau est très important. Sa pente est encore assez forte; son transport d'alluvion grossière doit être très puissant, et il l'est en réalité, comme nous l'avons vu en étudiant son delta. C'est une vraie rivière de montagnes basses. Si elle possédait quelques glaciers à ses sources, rien ne lui manquerait pour être une belle rivière alpine.

4° La Venoge, le plus grand des affluents du lac après la Drance, a un bassin fort étendu; son débit est assez considérable. Mais sa pente très faible doit réduire à peu de chose son transport de grosse alluvion; la Venoge salit le lac fort loin par son alluvion impalpable, abondante en temps de crue, mais son delta avance très peu.

5° Quant aux autres affluents, ou bien leur bassin d'alimentation est peu étendu, ou bien leur pente est très faible; leur faculté de transport doit être minime, et elle l'est réellement. Dans ce groupe, l'Aubonne avec ses 100^{km^2} de bassin de réception et sa pente de $2.3\,^0/_0$, est l'affluent qui a encore la plus grande action.

6° En additionnant les superficies de ces bassins des principaux affluents du lac, j'arrive à 1592^{km^2}. Le total du bassin d'alimentation du Léman qui revient aux affluents autres que le Rhône étant 2034^{km^2}, il reste 442^{km^2} à répartir entre les petits ruisseaux dont je n'ai pas mesuré le bassin. J'ai vérifié du reste ces chiffres par une mesure directe de la superficie du bassin de ces ruisseaux, qui m'a amené à 445^{km^2}; la différence est si faible, que j'y trouve une confirmation très satisfaisante des données ci-dessus utilisées.

Quant à la mesure du débit des affluents directs du Léman, voici les seuls faits que je possède.

1° En basses eaux, nous avons quelques jaugeages de quelques-uns des affluents du lac :

La Veveyse	24 février 1858	M. Ch. Dufour	$0.95^{m^3\ sec.}$ [1]
La Morge	»	id.	0.14
L'Aubonne	2 mars 1858	id.	0.34
La Monneresse	»	M. Doret-de la Harpe	0.25
La Veveyse, La Baye de Clarens, La Baye de Montreux	»	id. ensemble	0.75 à 0.80
La Veveyse à l'étiage,		M. Roussy	0.3

(1) Je désigne par cette abréviation le nombre de mètres cubes à la seconde.

2° J'ai essayé un calcul qui m'a donné le débit total des affluents directs du lac, en période de basses eaux. Le mois de septembre 1877, du 9 au 30, a été remarquable par une belle série de beau temps, sans pluie, avec une décrue régulière, non interrompue, du lac. J'ai choisi les 6 derniers jours de cette période pendant lesquels le lac a abaissé son niveau de 219^{mm}. Etant donnée la superficie du lac de 582.36^{km^2}, une telle baisse exprime une diminution de volume du lac de 127.5 millions de mètres cubes, soit un excès dans le débit de l'émissaire sur le débit total des affluents, de $248^{m^3 sec}$. Or je puis connaître le débit moyen du Rhône à Genève, car il est fonction de la hauteur du lac lorsque les barrages ne sont pas fermés. Par un calcul dont je donnerai les bases plus loin, je puis savoir que, dans cette période, le débit moyen de l'émissaire a été de $354^{m^3 sec}$. Si je soustrais de ce nombre celui qui exprime l'excès de débit de l'émissaire sur les affluents, soit $248^{m^3 sec}$, le reste exprimera le débit total des affluents du lac, soit $106^{m^3 sec}$. Or je puis connaître encore le débit du Rhône du Valais, il est fonction de la hauteur du fleuve. Par un calcul dont je donnerai plus loin les éléments, je trouve, d'après les observations fluviométriques du pont de Collombey, que le débit moyen dans ces six jours a été de $89^{m^3 sec}$. Si je soustrais du débit total des affluents le débit du Rhône du Valais, il me restera le débit des petits affluents directs du lac qui, dans ce cas, était $17^{m^3 sec}$; le chiffre $17^{m^3 sec}$ n'est pas le débit d'étiage; je le considère comme exprimant le débit moyen aux basses eaux.

3° En crues de débordement, j'ai les chiffres suivants :

La Drance, maximum de 1857 à 1866 (A. Delebecque) $166^{m^3 sec}$

La Veveyse ([1]) crue du 8 juillet 1873 (M. Doret-de la Harpe) $305^{m^3 sec}$

» » 29 août 1846 (M. Benj. Roy) 450

La Morge » 3 octobre 1888 (Ch. Dufour et F.-A. Forel), $15.6^{m^3 sec}$.

Pendant la grande crue du Léman du 2 au 3 octobre 1888, j'ai évalué le débit total des affluents directs du Léman par un calcul analogue à celui que je viens de donner, et en tenant compte de la pluie tombée directement sur le lac; je suis arrivé à un chiffre de $983^{m^3 sec}$, qui doit exprimer le maximum possible, ou peu s'en faut, du débit en temps de forte crue, simultanée, de l'ensemble des affluents directs du

([1]) Endiguement de la Veveyse. Lausanne 1878.

lac, sous l'action d'un orage de pluie d'une intensité et d'une généralité extraordinaires.

Pour la température des petits affluents du Léman, je n'ai que la série d'observations que j'ai faites en 1889 sur la Morge, petite rivière du plateau mollassique, courant au fond d'un ravin profond et bien ombragé; la longueur de son cours est de 11^{km}, son bassin de réception a 40^{km^2}, sa pente moyenne est de 2 $^0/_0$. En même temps que je mesurais la température de l'eau du ruisseau (à midi), j'allais prendre la température de la surface du lac à l'extrémité du débarcadère de Morges; j'ai pu en tirer une comparaison intéressante entre la température des eaux de la rivière et celles du lac; comme l'indique le tableau suivant, la rivière est plus froide que les eaux de surface du lac (région littorale), sauf pendant les mois d'avril et mai, et quelques jours de juin. Dans une colonne, j'indique le nombre de jours où j'ai constaté cette supériorité de la température fluviatile. Si nous y ajoutons les jours, indiqués dans la même colonne par des chiffres italiques, dans lesquels la densité de l'eau de la rivière était plus faible que celle du lac, le lac étant à peu près à 4° (maximum de densité de l'eau), et la Morge étant à 0° ou peu au-dessus, nous aurons, dans cette année, 92 sur 220 journées d'observation, soit les 4 dixièmes de l'année pendant lesquels les eaux de la rivière, plus légères, doivent s'étaler à la surface du lac. Pendant le reste du temps, l'eau de l'affluent, plus dense, fait cascade dans les eaux du lac, plonge dans la profondeur, comme nous le verrons à propos du Rhône (la Bataillère). Pour être complet, je donne enfin, dans une dernière colonne, le nombre des observations où la Morge était prise par la glace.

Température de la Morge en 1889.

1889 Mois	Nombre d'observations.	Température de la Morge.	Différence avec la temp. du lac.	Jours où la Morge était plus légère.	Jours où la Morge était gelée.
Janvier	21	0.6	—5.1°	*20*	14
Février	20	1.9	—3.3	*14*	6
Mars	21	4.0	—2.0	*3*	—
Avril	17	9.9	+1.7	16	—
Mai	22	14.8	+1.7	19	—
Juin	18	17.1	—0.5	6	—
Juillet	14	16.5	—4.0	—	—

1889 Mois	Nombre d'observations.	Température de la Morge.	Différence avec la temp. du lac.	Jours où la Morge était plus légère.	Jours où la Morge était gelée.
Août	20	16.0	—2.4	1	—
Septembre	15	12.3	—2.6	—	—
Octobre	16	11.0	—2.0	—	—
Novembre	19	7.8	—3.2	—	—
Décembre	17	1.4	—4.4	13	6

Il serait intéressant de voir répéter cette étude de la température sur d'autres affluents du lac, situés dans des conditions différentes.

III. **Le Rhône du Valais.**

Le Rhône est le principal affluent du Léman ; on peut même dire, si nos hypothèses sur la genèse du lac sont exactes, que le Léman n'est qu'un élargissement et un approfondissement accidentels du lit du fleuve. C'est lui qui, de beaucoup, fournit la plus grande masse d'eaux affluentes ; c'est lui qui règle le régime limnimétrique du lac. Il mérite donc d'être étudié attentivement.

Son bassin d'alimentation est de 5382.6^{km2} d'après les mesures de la commission hydrométrique suisse.

Celui des affluents directs, ou petits affluents, étant de 2034^{km2}, le bassin du Rhône forme plus des 7 dixièmes (0.72) du bassin total d'alimentation du lac.

De cette superficie de 5383^{km2}, il y a

en nature de glaciers . . . . 1000^{km2}

en nature de rochers, sables, champs, etc., 4400^{km2} environ.

Le cinquième environ du bassin du Rhône est donc formé de glaciers et neiges éternelles, ce qui est une proportion énorme. (1)

Ces neiges éternelles sont attaquées seulement par la chaleur de l'été qui les fait fondre activement. Il en résulte, comme pour tous les fleuves alpins, un régime spécial caractérisé par les traits suivants : en hiver, minimum des eaux qui descendent à l'étiage ; au printemps,

(1) Parmi les lacs suisses, il n'y a que le lac de Brienz dont le bassin d'alimentation soit relativement plus riche en glaciers. Sur les 610^{km2} qu'il représente, il y en a 161^{km2} en nature de neiges et glaciers, soit un quart environ. (Commission hydrométrique suisse.)

crues violentes par la fonte des neiges basses ; en été, maximum prolongé de hauteur du fleuve ; en automne, crues passagères en cas de grandes pluies chaudes.

Je donnerai deux exemples du débit du fleuve. M. l'ingénieur A. Bürkli-Ziegler, de Zurich, m'a communiqué des tracés graphiques permettant de trouver le débit en fonction de la hauteur des eaux, mesurée au pont de Chessel (Porte du Scex) observations de 1879-84, et au pont de Collombey, observations de 1874-77. J'en ai profité pour calculer le débit du fleuve dans les années 1879 et 1886. J'en donne ici les valeurs mensuelles en mètres cubes à la seconde, moyenne entre les deux chiffres obtenus dans les douze séries d'observation. (1)

Débit du Rhône.

	1879	*1886*
janvier	$62^{m3\ sec}$	$47^{m3\ sec}$
février	60	42
mars	62	57
avril	77	79
mai	110	132
juin	442	199
juillet	466	362
août	533	282
septembre	337	227
octobre	123	123
novembre	78	84
décembre	56	48

La justesse suffisante des calculs est prouvée par la concordance à peu près exacte des moyennes annuelles des deux séries de valeurs. C'est ainsi que pour l'année 1879 les calculs faits d'après les observations du pont de Colombey ont donné pour valeur moyenne $200^{m3\ sec}$ d'après celles de la Porte de Scex $190^{m3\ sec}$. Ces chiffres se résument en un débit moyen de $195^{m3\ sec}$ pour 1879, année de grandes eaux, (2)

(1) Cf. *F.-A. Forel.* Le ravin sous-lacustre du Rhône. Bull. S. V. S. N., XXIII 85 sq. Lausanne 1887.

(2) Que les eaux de 1879 aient été extraordinairement fortes, cela est prouvé par la hauteur extraordinaire des eaux du Léman, qui a été pendant cette année

pour la moyenne annuelle 426^{mm} au-dessus de la normale
» le maximum 504 » » » »
» » minimum 493 » » » »

F.-A. Forel. Contrib. à la limnimétrie du Léman. Vme série Bull. S. V. S. N. XVII, tableau XXI, p. 311. 1881.

de $142^{m3\ sec}$ pour 1886, année à peu près normale. Comme moyenne probable, j'admettrai $150^{m3\ sec}$.

$150^{m3\ sec}$ comme valeur moyenne de débit du Rhône valaisan me paraît un chiffre assez plausible. En effet, si nous le multiplions par le nombre de secondes de l'année, nous arrivons à un débit total annuel de 4730 millions ^{m3} qui, divisé par la superficie du bassin 5383^{km2}, donne une hauteur d'eau de 878^{mm}, étendue à la surface du bassin d'alimentation du Rhône.

Comparons ce chiffre à celui que nous donne la chute de pluie annuelle sur le bassin de réception du fleuve. Si nous planimétrons la partie de notre carte des pluies (pl. III, p. 304) qui appartient à ce bassin, nous trouvons, toutes réserves faites sur l'incertitude de la carte, une valeur moyenne pour la hauteur d'eau annuelle de 801^{mm}. Cette valeur est plus petite que celle que nous obtenons par le calcul du débit du Rhône 878^{mm}. Comment expliquer cette différence ? Cette différence est d'autant plus frappante que, de la chute d'eau annuelle, nous aurions à soustraire la quantité certainement considérable enlevée par l'évaporation et qui ne revient pas au Rhône. Mais si, en revanche, nous faisons intervenir la quantité d'eau [1] déposée par condensation directe sur les corps froids et spécialement sur les neiges et les glaces, nous aurons l'explication de l'anomalie apparente. La condensation directe, qui n'apparaît pas sous forme de pluie, qui échappe par conséquent au pluviomètre, est plus forte que l'évaporation dans un pays si riche en glaciers que le Valais. La somme algébrique de la chute d'eau annuelle, de la condensation directe et de l'évaporation, peut donc, sans que nous ayons à trop forcer les chiffres, nous amener à des valeurs qui correspondraient assez bien à un débit du Rhône de $150^{m3\ sec}$.

Le débit du Rhône, à son entrée dans le lac, est évalué par M. R. Lauterburg [2] aux chiffres suivants :

[1] La condensation de la vapeur d'eau sur une surface glacée peut donner des quantités d'eau assez importantes, ainsi que nous l'avons montré, M. Ch. Dufour et moi-même par nos expériences de 1870 sur le glacier du Rhône (Bull. S. V. S. N. X, 621, 1870.) Nous sommes arrivés, dans les conditions les plus favorables, à des valeurs de 0.15^{mm} pour l'épaisseur d'eau déposée par heure à la surface du glacier. Si le même dépôt s'effectuait sur l'ensemble des 1000^{km2} des glaciers du bassin du Rhône, cela représenterait une quantité de $150\,000^{m3}$ d'eau par heure, soit un débit de $42^{m3\ sec}$.

[2] *R. Lauterburg.* Versuch zur Ausstellung einer Uebersicht der schw. Stromabflussmengen p. 65. Bern 1876,

minimum	$9^{m3\ sec}$
basses eaux moyennes	57
eaux moyennes	199
hautes eaux moyennes	737
maximum	1692

Ce dernier chiffre me paraît trop fort : je me fonde sur deux faits pour justifier cette critique.

A. Le graphique Bürkli-Ziegler donne $1074^{m3\ sec}$ comme débit probable du Rhône lorsque ses eaux sont au pont de Collombey à la cote 4.4^{m} du fluviomètre. Or les plus hautes eaux que j'aie su trouver dans les observations hydrométriques suisses sont celles du 2 juillet 1879, qui sont restées à la cote 4.1^{m} de cette même échelle.

B. La crue du Léman la plus rapide que nous connaissions (en dehors de celle de 1888, laquelle était due uniquement aux affluents directs du lac et à la fermeture du barrage de Genève) est celle du 24 au 25 mai 1878, pendant laquelle le lac est monté de 155^{mm} en 24 heures. Un calcul analogue à celui de la page 357 me donne pour le débit total des affluents du lac $1475^{m3\ sec}$. (1) Dans ce cas-là, une notable partie de la crue doit être attribuée aux affluents directs du lac qui étaient extraordinairement gonflés par la pluie ; (2) le Rhône n'a pas été exceptionnellement fort, et, en réalité, il n'a atteint ce jour-là au fluviomètre du pont de Collombey que la cote 3.0^{m}, ce qui correspond à un débit de $552^{m3\ sec}$ d'après le graphique Bürkli-Ziegler. Mais le fait que nous n'avons pas, depuis l'ère des observations limnimétriques authentiques, de crue du lac supérieure à celle qui nous occupe, et que cette crue n'a amené un débit total des affluents que de $1475^{m3\ sec}$, m'empêche d'admettre comme probable un débit maximal du Rhône seul de $1692^{m3\ sec}$, comme le veut M. Lauterburg.

Je connais les jaugeages suivants faits dans le Rhône du Valais :

			$m3\ sec$
17 mai 1843	Vallée [3]	St-Maurice hautes eaux	350
1843	»	» basses »	58
2 février 1858	F. Burnier et L. Dufour [4]	Porte du Scex	27
8 avril 1863	J Gay [5]	»	55

(1) *F.-A. Forel*. Contribution à la limnimétrie du Léman. IVme série. Bull. S. V S. N., XVI, 645, 1880

(2) A Genève il est tombé ces jours-là une hauteur d'eau de 57^{mm}.

(3) Comptes-rendus Acad de Paris, XIX, 930, 1844.

(4) Bull. S. V. S. N. VI, 6, 1858.

(5) D'après M. Ch. Dufour cité dans *A. Favre*. Recherches, I., 15.

			m3 sec
14-15 septb. 1863	J. Gay	Porte du Scex	193
23 avril 1874	Bernard [1]	»	89
18 juin 1874	»	»	187
7 juillet 1874	»	»	505
21 juillet 1877	Legler [2]	»	505
29 mai 1887	J. Epper [3]	»	88

La pente du Rhône en Valais est assez irrégulière : il présente par place des rapides et ailleurs de longs paliers où la pente est presque nulle. Voici quelques chiffres moyens calculés d'après les cotes de l'Atlas Siegfried en partageant la vallée dans sa longueur et en divisant le cours du fleuve en rapides et en pentes douces ; la pente est donnée en millièmes de la longueur du trajet.

		longueur	pente
1er rapide	de Gletsch à Oberwald	3.5^{km}	109 $^{00}/_{00}$
Vallée de Conche	d'Oberwald à Blitzingen	15.7	8
2me rapide	de Blitzingen à la Massa	14.3	39
Plaine de Brigue	de la Massa à la Souste	22.0	4
3me rapide	de la Souste à Sierre	8.2	8
Plaine de Martigny	de Sierre au Bois-noir	51.5	2
4me rapide	du Bois-noir à Massongex	5.8	4
Plaine du bas Rhône	de Massongex au Léman	19.0	2

Ainsi, de l'embouchure de la Massa au Léman, soit dans son cours paisible à travers la vallée du Valais, le Rhône n'a qu'une pente de 3 $^{00}/_{00}$. Dans la partie montagneuse de Gletsch à Oberwald la pente s'élève à 109 $^{00}/_{00}$, 11 $^{0}/_{0}$. La pente générale de Gletsch (hôtel du Glacier du Rhône) au lac est de 9 $^{00}/_{00}$.

Le Rhône du Valais divaguait autrefois librement dans la vallée ; de grandes étendues de marais et de terres basses étaient inondées à chaque crue. Un seul chiffre suffira à donner une idée de ces inondations. Dans les crues du 1er au 3 septembre 1860, les plus terribles dont l'on se souvienne, la surface approximative inondée en dehors du lit du Rhône s'est élevée à 71^{km2}, près du huitième de la surface du lac. [3]

Les travaux d'endiguement qui ont été exécutés de 1863 à 1880

(1) *K. Pestalozzi* et *H. Legler*. Rapport sur les conditions de l'écoulement du Rhône à Genève. p. 15, Lausanne 1876.

(2) Communiqué par le bureau vaudois des ponts et chaussées.

(3) Communication originale de M. Zen Ruffinen, ingénieur des ponts et chaussées du Valais *in litt.* 27 oct. 1887.

aux frais des communes et de l'Etat du Valais et de la Confédération suisse, et qui ont coûté plus de 11 millions de francs, ([1]) ont très heureusement paré à ces désastres. Depuis leur construction, ces digues n'ont pas été surmontées par les hautes eaux du fleuve, ni lors des écoulements du lac Merjelen le 9 juin 1882, août 1884, 4 septembre 1887, 24 juin 1889, 25 juillet 1890, ni lors des plus fortes crues du fleuve. Il y a eu cependant rupture des digues près de St-Léonard le 31 juillet 1888 et inondation partielle de la rive droite du fleuve.

Les grandes inondations du Rhône dans les trente dernières années ont eu lieu : ([2])

en 1885		plaine de Monthey
1857		plaine de Martigny
1860	1-3 septembre	de Brigue à Louèche et de Sierre à Riddes
1868	30 mai	cote 2.8^m de l'étiage
—	28-29 juin	» 3.0 » »
—	24 juillet	» 3.5 » »
—	18 août	» 3.8 » »
—	4 octobre	» 3.7 » »
1888	31 juillet	plaine de St-Léonard

La température des eaux du Rhône a été mesurée, sur ma demande, par les gendarmes Bourgeois et Bettemps, du poste de St-Maurice, chaque jour de l'année 1886, à l'heure de midi. J'ai tiré de ces observations les moyennes suivantes : ([3])

Janvier	1.6°	Juillet	9.7°
Février	2.3	Août	9.7
Mars	5.0	Septembre	9.3
Avril	9.3	Octobre	8.4
Mai	10.5	Novembre	4.8
Juin	10.5	Décembre	2.1

D'où je tire les moyennes des saisons.

Hiver	2.0°
Printemps	8.3
Eté	10.0
Automne	7.5

([1]) Zeitschrift für schweiz. Statistik, XXIV, 179.

([2]) Notice sur la correction du Rhône 1864 à 1879. Sion 1877.

([3]) *F.-A. Forel.* Le ravin sous-lacustre du Rhône. Bull. S. V. S. N., XXIII, 85 Lausanne, 1887.

Ou en les groupant d'une manière plus rationnelle :

Saison froide, de novembre à mars	3.2°
Saison chaude, d'avril à octobre	9.6
Moyenne de l'année	6.9
Maximum observé	12.7
Minimum, quand le Rhône charriait	0.0

Jusqu'au 17 mars, la température du Rhône est restée inférieure à 5° ; elle s'est élevée au-dessus de ce chiffre du 18 mars au 19 novembre, soit pendant huit mois entiers; dans les dernières semaines de l'année, elle est redescendue au-dessous de 5°.

Pour apprécier la variation diurne, j'ai fait faire encore quelques mesures le matin et le soir; l'amplitude de la variation, assez différente suivant les saisons, s'est élevée jusqu'à 4°; en général elle est restée inférieure à 2°.

Nous ne connaissons, sur la composition des eaux du Rhône, que les recherches faites par M. B. Buenzod, pharmacien à Morges, sur quinze échantillons d'eau que M. le chanoine Besse, de St-Maurice, avait recueillis pour moi. M. Buenzod a déterminé par filtration la teneur en alluvion suspendue, par évaporation à siccité la teneur en sels dissous. Je vais donner les résultats de ces analyses, et en tirer la densité des eaux du fleuve. Mais auparavant, je dois me poser une question : Etant connu le poids des matières contenues soit en dissolution, soit en suspension, dans les eaux, avons-nous le moyen d'en déduire la densité de ces eaux? La question est importante; je vais la discuter, et comme cette discussion intéresse essentiellement la densité relative des eaux du lac et de celles de l'affluent, je vais la traiter à ce point de vue.

A. *Densité relative d'eaux contenant des sels dissous.* De l'eau contenant une matière dissoute est plus ou moins dense que l'eau pure; un sirop de sucre est plus lourd que l'eau, une solution alcoolique est plus légère.

La différence de densité est proportionnelle à la quantité de matières dissoutes, si les solutions sont de même nature; pour deux solutions de nature différente, la densité doit être proportionnelle, non seulement aux quantités, mais encore aux densités relatives des matières dissoutes. Me basant sur ces propositions, qui semblent évidentes, je comptais calculer la densité relative des deux eaux qui nous inté-

ressent, les eaux du Rhône et les eaux du lac, en admettant que leur densité serait égale à celle de l'eau pure, plus le poids de la matière en solution, moins le volume de l'eau déplacée par cette matière.

Un tel calcul est-il légitime ? Incontestablement oui, si l'on peut déterminer dans chaque cas le volume d'eau déplacée dans l'acte de la solution, l'augmentation de volume de l'eau dans laquelle on fait dissoudre le sel.

Mais cette augmentation de volume diffère pour les divers sels. C'est ce que mon collègue, M. le professeur E. Chuard, de Lausanne, répondant à mes questions, a élucidé par l'exposé suivant :

« Il n'est pas possible de déduire, de la connaissance du poids et de la densité du résidu fixe de l'eau, la densité de la solution préexistante.

« J'ai pris, par exemple, du chlorure de potassium dont la densité est très approximativement 2 (en réalité 1.996); j'ai préparé deux solutions :

l'une au 1 % densité 1.0065
l'autre au 10 % » 1.0658

« Les valeurs de ces densités sont données par Biedermann (*Chemisches Kalender*); je les ai vérifiées à l'aréomètre normal.

« Or par le calcul que vous proposez d'appliquer, on trouve :

1er solution	995cm3 eau, densité	1.0	=	995 gr.
	5cm3 KCl	» 2.0		10
	Densité calculée . .			1.005

et non 1.0065 que donne l'expérience.

« Par le même calcul on trouve pour la 2e solution une densité de 1.050 et non 1.0658.

« Il y a donc écart considérable sur les chiffres de l'expérience.

« D'autre part, même si l'on obtenait une concordance entre les chiffres calculés et les chiffres trouvés expérimentalement, on ne pourrait appliquer un raisonnement analogue à la détermination théorique de la densité de l'eau, étant connues la quantité et la densité moyenne du résidu fixe de l'eau. Il faudrait encore tenir compte, non seulement des gaz en dissolution dans l'eau, mais encore du fait que la plus grande partie du résidu, les carbonates de calcium et de magnésium, sont en dissolution dans l'eau à l'état de bicarbonates, sels sur lesquels on n'a pas de données physiques, vu leur instabilité. »

Je m'incline devant les arguments de M. Chuard, et je reconnais

qu'en calculant la densité de l'eau d'après la teneur en sels dissous, je ferai une erreur. Mais cette erreur sera certainement faible; la différence dans la quantité des sels en dissolution dans les deux eaux n'est pas considérable, et la nature de ces sels est probablement à peu près la même, l'eau du lac étant pour la majeure partie de l'eau du Rhône. Tout en convenant donc qu'il y a une légère erreur probable dans mon calcul, j'établirai celui-ci de la manière suivante :

Eau du lac. (1) Matières dissoutes	174	mgr. par litre.
Densité de ces matières, calculée : 2.4.		
Poids d'eau déplacée	73	» »
Excès de poids.	101	» »
Eau du Rhône du 6 juillet 1886 (nº X) :		
Matières dissoutes	240	mgr. par litre.
Densité : 2.68. (2)		
Poids d'eau déplacée.	92	» »
Excès de poids.	148	» »

Il y aurait, d'après ce calcul, un excès de poids de 47 mgr. par litre en faveur de l'eau du Rhône, ce qui donnerait, toutes choses égales d'ailleurs, un excès de densité de 0.000 047.

Répétons-le : je sais que par un tel calcul nous faisons probablement une erreur; mais je sais que cette erreur est certainement peu forte et qu'elle n'est pas en tous les cas une erreur de signe. Je me sens en droit d'affirmer que, du fait des matières en dissolution dans l'eau, il y a un léger excès de densité dans les eaux du Rhône comparées à celles du lac, et qu'il y a lieu d'en tenir compte pour l'étude des densités relatives.

B. *Densité relative des eaux contenant de l'alluvion en suspension.* Tandis que l'eau du lac ne contient pas normalement de matières lourdes en suspension, l'eau du Rhône en est fortement chargée; la quantité a varié en 1886, d'après les analyses de M. Buenzod, de 0.04 à 2.25 gr. par litre. Cette alluvion augmente-t-elle la densité de l'eau ?

Je n'avais pas mis cette question en doute, quand j'ai écrit ma première note sur les ravins sous-lacustres (3) ou quand je me suis occupé

(1) Nous donnerons dans un chapitre ultérieur la justification de ces chiffres.

(2) Pour la densité des matières dissoutes dans l'eau du Rhône, j'ai pris 2.68, soit la densité de l'alluvion du fleuve, détermination de M. E. Chuard.

(3) Comptes-rendus. Acad. sc. Paris, CI, 725, 1885.

de l'inclinaison des plans isothermes dans les eaux profondes du Léman.[1] Mais quelques critiques m'ont été faites à ce sujet par des hommes de grande autorité, qui ont refusé d'admettre que des solides en suspension dans l'eau pussent augmenter la densité du liquide. Vous avez affaire, m'ont-ils dit, à de l'eau, ayant et gardant sa densité d'eau, qu'elle soit ou non traversée par des solides qui tombent dans cette eau.

J'ai donc dû reprendre la question *ab ovo* et chercher si l'alluvion en suspension dans un liquide augmente, oui ou non, la densité de ce liquide. J'ai traité le problème par voie d'expérience (mai 1887).

Exp. I. Dans un vase plein d'eau, j'ai laissé reposer au fond une masse d'argile lacustre moderne, alluvion du plafond du lac Léman J'ai placé dans l'eau un aréomètre et j'ai laissé s'établir l'équilibre thermique. L'aréomètre est au zéro dans l'eau limpide; lorsque j'agite le limon pour le mettre en suspension dans l'eau, je vois l'aréomètre se soulever notablement, en indiquant que l'eau trouble est plus dense que l'eau limpide.

Exp. II. Sous une balance hydrostatique, j'ai suspendu par un fil une sphère de verre, alourdie par du plomb jusqu'à ce qu'elle dépassât de très peu la densité de l'eau. Je l'ai pesée successivement dans l'eau limpide et dans la même eau troublée par l'alluvion en suspension; j'ai constaté que, dans cette dernière, le solide pesait moins, que par conséquent la densité de l'eau était augmentée.

Ces deux expériences montrent un excès de densité dans l'eau chargée d'alluvion. Quelle est la valeur de cet excès? L'alluvion suspendue dans l'eau augmente-t-elle la densité de cette eau de tout son poids (pesé dans l'eau) ou seulement d'une fraction de ce poids? L'expérience suivante répond à cette question.

Exp. III. Je place un bassin plein d'eau chargée d'alluvion sur une balance sensible, et je l'équilibre exactement par des poids. Puis, alternativement, je laisse déposer l'alluvion au fond du vase, ou je la mets en suspension dans l'eau en l'agitant avec une baguette. Je ne constate pas de différence appréciable dans le poids du bassin.

Le volume de l'eau n'a pas changé; que l'alluvion fût déposée au fond du vase, ou qu'elle fût en suspension dans l'eau, son poids n'a pas non plus changé. Donc la densité de l'eau trouble est égale à la

(1) Comptes-rendus. Acad. sc. Paris, CII, 712. 1886.

moyenne proportionnelle des deux densités de l'eau et de l'alluvion. Donc, pour obtenir la densité de l'eau trouble, je n'ai qu'à additionner le poids de l'alluvion par unité de volume d'eau et à soustraire le poids de l'eau déplacée par l'alluvion.

Mais comment concilier cela avec l'expérience classique de Leibnitz? Dans un vase d'eau, posé sur une balance, on place un flotteur et on suspend sous celui-ci une balle de plomb; on équilibre avec des poids, puis on coupe le fil et on laisse tomber la balle à travers l'eau. Pendant tout le temps de la chute, la balance s'incline et montre que le poids du vase, eau et plomb, s'est allégé; l'équilibre ne se rétablit qu'au moment où la balle repose sur le fond du vase.(1)

Les résultats de cette expérience sont très différents de ceux que j'ai obtenus avec de l'alluvion impalpable. Dans l'expérience de Leibnitz, il y a diminution du poids du vase quand le solide traverse l'eau pendant la chute; dans mon expérience III, il y a égalité de poids. D'où vient cette différence?

Les seules conditions qui soient dissemblables résident dans les caractères du mouvement. Dans le cas de la balle de plomb, il y a chute accélérée dans l'eau; le solide part de la vitesse initiale nulle, pour atteindre le fond du vase avant que les frottements de l'eau aient transformé le mouvement accéléré en un mouvement uniforme. Dans le cas de l'alluvion suspendue dans l'eau, vu la très petite masse des particules de l'alluvion impalpable, le mouvement devient très vite, presque immédiatement, un mouvement uniforme; il n'y a plus trace d'accélération.

Ne pourrait-on pas modifier l'expérience de Leibnitz de telle manière que le gros solide que l'on fait tomber dans l'eau acquière l'uniformité de chute avant qu'il ait atteint le fond du vase? J'y suis arrivé comme suit :

Exp. IV. Je place sur une balance une longue éprouvette pleine d'eau. Je dépose sur le même plateau de la balance un bloc de cire que j'ai alourdie avec du plomb jusqu'à lui donner une densité légèrement supérieure à celle de l'eau; le poids de ce bloc placé dans l'eau est facilement appréciable à la sensibilité de ma balance. J'équilibre exactement avec des poids. Puis je jette dans l'eau le bloc de cire, qui descend lentement, vu sa faible densité, et qui, au lieu du mouvement

(1) Voir la jolie variante de cette expérience, par M. L. Dufour. Bull. S. V. S. N. XI, 322. Lausanne 1872.

accéléré de la balle de plomb de Leibnitz, prend bientôt un mouvement uniforme. Au même moment, la balance, qui avait fléchi pendant que je soutenais de la main le bloc de cire, se remet en équilibre, longtemps avant que le solide ait atteint le fond du vase; elle garde, cela va sans dire, cette position d'équilibre quand le solide repose sur le fond. Le bloc de cire exerce le même effet sur la balance, qu'il soit suspendu dans sa chute de vitesse uniforme à travers l'eau, ou qu'il repose sur le plateau de la balance, qu'il soit dans l'eau ou qu'il soit hors de l'eau.

Exp. V. J'ai fait une variante de l'expérience précédente en employant, au lieu d'un bloc de cire de faible densité, une sphère lourde, dont le diamètre atteignait presque le diamètre interne de l'éprouvette. Dans sa chute à travers l'eau, la sphère lourde refoulait l'eau située au-dessous d'elle et la faisait passer au-dessus d'elle, en la forçant dans l'espace annulaire très étroit par où elle devait s'écouler; la chute était ainsi très ralentie et le mouvement devenait uniforme. Dans ces conditions aussi, l'équilibre de la balance était immédiatement rétabli.

J'ai parlé jusqu'à présent d'une augmentation de densité de l'eau par le fait de l'alluvion en suspension; l'expression n'est pas absolument exacte. Je devrais dire : l'eau, quand elle est chargée d'alluvion, se comporte comme s'il y avait augmentation de la densité. Ce n'est pas, en effet, une augmentation réelle de densité, car l'eau reste de l'eau, et sa densité d'eau n'est pas changée; mais il y a action mécanique, pression développée sur le fond du vase, déterminant par action dynamique un effet égal à celui d'une augmentation de poids statique. Cette action dynamique est prouvée par l'expérience suivante :

Exp. VI. Je suspends par un fil une balle de plomb dans un vase plein d'eau en équilibre sur une balance. Alternativement, je laisse tomber le solide dans l'eau ou je le relève. Pendant la chute, qu'elle soit lente ou rapide, accélérée ou uniforme, la balance s'infléchit du côté du vase, le vase s'alourdit; pendant le relèvement de la balle, le vase s'allège.

De ces diverses expériences, je conclus que l'eau, tenant en suspension de l'alluvion, comme l'eau du Rhône, se comporte comme si la densité était augmentée, et que cette augmentation de densité est proportionnelle à la charge d'alluvion.

Mon collègue, M. le professeur H. Dufour, de Lausanne, auquel j'a-

vais posé la question qui me préoccupait, a fait de son côté une série d'expériences plus ou moins analogues à celles que je viens de relater et est arrivé à la même conclusion que moi.

Le Dr A.-A. Odin, alors à Yverdon, plus tard professeur à Lausanne, le collègue qu'une mort prématurée a enlevé si jeune à la science et à ses amis, a, d'autre part, traité la question par voie mathématique ; il m'avait autorisé à publier son raisonnement dans les termes suivants :

« Le problème que nous nous proposons de résoudre est celui-ci :

« Un corps tombant verticalement dans un liquide, quelle est, à un moment donné, la pression exercée par ce corps sur le fond du vase ou sur une paroi horizontale quelconque du liquide ?

« Soit C le corps solide en question, m sa masse, P son poids, v la vitesse de haut en bas. La pression exercée par C sur la paroi inférieure B est uniquement transmise par la résistance du liquide; cette résistance est produite par des forces résultant, soit de la pression des molécules du liquide les unes sur les autres, soit de leur frottement; appelons r cette résistance. Le corps C est soumis à l'action des forces P et r, de sorte que l'équation de son mouvement est :

$$P - r = m \frac{dv}{dt}$$

t représentant le temps à partir du moment où C commence à se mouvoir, c'est-à-dire à $v = 0$.

« Cette équation nous suffit, à elle seule, pour la discussion complète du mouvement du corps C. En effet, au moment où ce dernier commence à tomber, la vitesse est nulle; mais alors la pression qu'il exerce sur le fond du liquide est égale au poids p d'un égal volume de ce liquide; donc, pour $v = 0$, on a $r = p$. Dès le commencement de la chute, la vitesse augmente et la résistance r augmente aussi, car à la pression hydrostatique p vient s'ajouter une pression hydrodynamique provenant du frottement de l'eau. Si nous admettons, ce qui paraît évident, que r croisse en même temps que v, nous voyons par l'équation ci-dessus que cette augmentation de valeur doit durer tant que $\frac{dv}{dt}$ ne sera pas devenu nul, c'est-à-dire tant que r ne sera pas égal à P. Lorsque cet état sera atteint, le mouvement du corps C sera devenu uniforme et la pression r exercée sur lui par la paroi B sera égale à son poids.

« C'est ce qui a lieu pour les particules solides en suspension dans un liquide, et qui se meuvent du haut en bas. Pour les particules se mouvant obliquement, la loi n'est pas la même ; on le reconnaît immédiatement en considérant celles qui se meuvent horizontalement ou verticalement de bas en haut. Nous pouvons donc énoncer cette conclusion :

« Lorsqu'un liquide contient une matière solide en suspension, on peut calculer directement sa densité en ajoutant le poids des particules solides au poids du liquide, à la condition que l'on soit en droit d'admettre que la presque totalité des particules solides se meuvent verticalement de haut en bas. »

Odin arrivait ainsi par la théorie pure au même résultat que nous avait donné, à M. Dufour et à moi, la voie d'expérimentation physique.

Je suis donc fondé à faire le calcul suivant :

Le 6 juillet 1886, l'eau du Rhône contenait une charge de 2.25^{g} par litre, d'alluvion impalpable sèche.

Cette alluvion, nous la connaissons quand elle est déposée au fond du lac. D'après l'étude de M. le professeur E. Chuard (voyez p. 122), sa densité est de 2.68.

Le volume d'eau déplacé par ces 2.25^{g} est donc de 0.847^{cm3}, soit 0.847^{g}.

L'excès de charge par litre est donc 1.403^{g}.

Avant d'arriver à la densité de l'eau du Rhône, calculée d'après les charges des matières dissoutes et suspendues trouvées par M. Buenzod dans les échantillons d'eau de St-Maurice, je dois faire intervenir la notion de la température d'après les mesures faites par les gendarmes du pont de St-Maurice. Je continue ce calcul dans mon exemple du 6 juillet.

L'eau avait ce jour-là une température de 10.7°. A cette température, l'eau pure a une densité de 0.999 694 d'après la formule de Kopp, l'eau distillée à 4.0° étant l'unité.

L'eau pure du 6 juillet pesait par litre	999 694 ^{mg}
Elle contenait 240^{mg} d'alluvion dissoute donnant dans l'eau un excès de charge de	148 »
2250^{mg} d'alluvion suspendue donnant dans l'eau un excès de charge de	1 403 »
le poids d'un litre était donc	1 001 245^{mg}

La densité de cette eau était donc 1.001 245.

Dans le tableau suivant, je répète ce calcul pour les 15 échantillons d'eau du Rhône de 1886.

Ce tableau renferme :

Le débit approximatif du fleuve d'après les lectures du jour à l'échelle fluviométrique.

La température de l'eau d'après les observations des gendarmes de St-Maurice.

La teneur en matières dissoutes et en matières suspendues (alluvion impalpable), d'après les analyses de M. Buenzod; ces valeurs sont données à l'unité du milligramme par litre, soit en millionièmes.

Enfin la densité rapportée à celle de l'eau distillée à 4° d'après les calculs ci-dessus exposés.

N°	Date 1886	Débit du fleuve *m³ sec*	Températ. de l'eau °	Matière dissoute *mgr. litre*	Matière en suspension *mgr. litre*	Densité
I	11 janvier	48	0.0	230	65	1.000 053
II	21 février	40	2.7	230	80	— 167
III	17 mars	42	4.2	250	39	— 169
IV	22 —	62	7.2	250	290	— 259
V	2 avril	80	9.7	280	330	— 148
VI	27 —	87	11.5	230	850	— 285
VII	12 mai	102	12.2	250	1200	— 451
VIII	21 —	195	12.7	250	1850	— 790
IX	7 juin	257	9.7	230	1520	— 865
X	6 juillet	365	10.7	240	2250	— 1245
XI	30 —	298	9.7	190	890	— 447
XII	21 août	210	10.2	190	230	0.999 993
XIII	29 septembre	119	10.2	180	400	1.000 093
XIV	21 octobre	114	7.7	185	1050	— 674
XV	26 novembre	74	1.7	192	150	— 164

Le chiffre le plus élevé du transport du Rhône, matières en solution et en suspension (N° X), est donc de 2.490g, disons 2 ½ grammes par litre. Cette charge est forte; mais c'est bien peu de chose comparativement à l'eau de mer, qui, rien qu'en sels dissous, en contient 35 grammes par litre. C'en est la quatorzième partie seulement.

Des chiffres de ce tableau il résulte les faits suivants :

a La quantité des matières dissoutes est peu variable, oscillant

autour de 24^{gr} par litre de résidu sec dans la première moitié de l'année, oscillant autour de 19^{gr} dans la deuxième moitié.

b La teneur en alluvion suspendue varie considérablement : en hiver, elle est à peu près nulle et les eaux du fleuve, d'un bleu légèrement teinté de vert, sont presque limpides ; elle s'élève dès le premier printemps, lors de la fonte des neiges basses ; elle atteint son maximum en été, où elle dépasse 2^{g} par litre. Les eaux sont alors d'un gris jaunâtre, presque absolument opaques, et forment un écran impénétrable à l'œil sous quelques centimètres d'épaisseur. En automne, les eaux redeviennent limpides et perdent leur charge d'alluvion.

c La teneur d'alluvion en suspension croît à peu près régulièrement en fonction directe de la hauteur des eaux du fleuve et de son débit. On constate cependant une différence entre la période où les eaux sont en crue et celle où elles sont en décrue ; leur teneur en alluvion pour le même débit est beaucoup plus faible dans la deuxième moitié de l'année.

d La densité des eaux du Rhône est très généralement supérieure à celle du maximum de densité de l'eau distillée. Un seul échantillon, le N° XII, du 21 août 1886, avait une densité inférieure à 1.000.

Cherchons à obtenir de ces observations isolées, exprimant le transport du Rhône, des faits intéressant la physique du lac. Pouvons-nous en tirer la valeur annuelle de ce transport? Je le crois, si du moins on ne nous demande pas une approximation trop exacte. (1)

En rapportant la charge d'alluvion du Rhône à la hauteur du fleuve ou à son débit au jour de la prise des échantillons, j'ai reconnu que cette charge d'alluvion en suspension varie suivant que le Rhône est en état de crue ou en état de décrue. J'ai essayé, en corrigeant par la méthode graphique les irrégularités de l'expérimentation, de dresser un tableau (d'approximation très peu serrée), dans lequel j'exprime la charge d'alluvion impalpable en suspension, traduite en grammes par mètre cube pour les différents débits du fleuve, soit en crue, soit en décrue :

(1) Il serait fort désirable qu'un physicien entreprît sur le Rhône du Valais un travail complet, analogue à celui que le Dr B. Baëff fait sur l'Arve ; nous donnerons plus loin un extrait de ce dernier travail.

Débit du Rhône	Charge d'alluvion en crue	Charge d'alluvion en décrue
$40^{m^3\ sec}$	$80^{g\ m^3}$	$40^{g\ m^3}$
80	550	200
120	950	400
160	1250	630
200	1530	810
240	1740	990
280	1940	1160
320	2100	—
360	2250	—

En utilisant les valeurs de ce tableau et connaissant d'autre part le débit moyen du Rhône pour les divers mois de l'année 1886, j'ai établi le transport d'alluvion, suspendue et dissoute, de cette année. Dans une première colonne, je donne le débit moyen d'après les hauteurs du fleuve; dans les colonnes 2 et 3, je donne la charge d'alluvion par mètre cube, l'alluvion suspendue dépendant du débit du fleuve en crue ou en décrue, l'alluvion dissoute d'après les chiffres des analyses Buenzod; les colonnes 4 et 5 donnent le transport en kilogrammes par seconde des deux types d'alluvion; la dernière colonne, le transport total.

1886	*Débit.*	*Charge par m³.*		*Transport par seconde.*		
		Alluvion		*Alluvion*		
		suspendue	*dissoute*	*suspendue*	*dissoute*	*total*
	m³ sec	gr. m³	gr. m³	kg. sec	kg. sec	kg. sec
janvier	47.0	120	230	6	11	17
février	45.2	70	230	3	10	13
mars	57.3	250	250	14	14	28
avril	79.2	550	255	44	20	64
mai	132.2	1050	250	139	33	172
juin	198.8	1530	230	304	46	350
juillet	381.7	2320	215	886	82	968
août	281.7	1180	190	332	54	386
septembre	227.2	940	180	214	41	255
octobre	123.2	430	185	53	23	76
novembre	84.3	220	192	19	16	35
décembre	47.8	40	210	2	10	12

Le transport moyen des eaux du Rhône est :

en alluvion suspendue	168$^{kg\ sec}$
en alluvion dissoute	30
ensemble	198

Disons 200^{kg} par seconde. Soit, par année, 6300 mille tonnes. Si nous donnons à cette alluvion la densité moyenne de 2.68, ces 6300 mille tonnes représentent 2350 mille $^{m^3}$.

Le Rhône a donc dans l'année 1886, enlevé à son bassin d'alimentation une quantité de matières, soit à l'état de poussière impalpable, soit à l'état de solution, équivalant à 2350 mille $^{m^3}$. Or son bassin d'alimentation est de 5383$^{km^2}$. Ce volume, réparti sur cette surface, représente une couche de 0.44^{mm}, moins d'un demi millimètre.

Il y aurait à ajouter à cette quantité celle qui correspond à l'alluvion grossière charriée par le fleuve. Je n'ai pas les éléments qui me permettraient d'en calculer la valeur pour le Rhône, mais, comme nous l'avons dit, elle ne doit pas être très considérable. Heim a évalué la quantité d'alluvion grossière apportée par la Reuss dans le lac des Quatre-Cantons à un volume correspondant à l'ablation de 242$^{m^3}$ par an et par kilomètre carré du bassin d'alimentation, (1) ce qui équivaut à une couche annuelle de 0.24^{mm} sur la surface de ce bassin. Si nous admettons la même valeur pour le Rhône du Valais, et si nous supposons que les chiffres obtenus en 1886 représentent des valeurs moyennes, nous aurions pour l'ablation totale en alluvion grossière, alluvion impalpable et alluvion dissoute, une quantité annuelle équivalant à $0.44 + 0.24 = 0.68^{mm}$ de la surface du bassin d'alimentation. Il faudrait à l'érosion du Rhône et de ses affluents une durée de 1470 ans, disons 1500 ans, pour enlever, sur l'ensemble du bassin, une couche d'un mètre d'épaisseur. (2)

Ne nous occupons maintenant que de l'alluvion en suspension; l'alluvion impalpable qui se déposera dans le Léman quand les eaux du Rhône s'y clarifieront, et qui en comblera le bassin. A 168 kilogram-

(1) *A. Heim*. Gletscherkunde, p. 365.

(2) N'oublions pas que cette érosion est localisée dans une très petite partie du bassin d'alimentation du fleuve, sur les berges des torrents et rivières, sur les parois dégarnies de végétation et exposées aux ravinements de la pluie, enfin dans les lits des glaciers. Là, l'érosion est souveraine et enlève de puissantes masses de matériaux.

mes par seconde, valeur moyenne des 12 valeurs mensuelles, cela représente, pour l'année 1886, un transport de 14 515 tonnes de mille kilogrammes par jour, 5297 mille tonnes par an.

Pour la densité de cette alluvion, nous lui donnerons celle de l'argile du Léman qui en est essentiellement formée, soit 2.68. Avec cette densité, 5297 mille tonnes représentent un volume de 1976 mille ^{m3}; soit environ 2 millions de mètres cubes.

En discutant la signification de ce chiffre, je pourrais montrer que, vu les circonstances climatériques de l'année 1886, le transport devait avoir, cette année-là, une valeur moyenne; que dans ce chiffre n'entre pas le transport effectué sur le lit du fleuve par le charriage des graviers et galets qui doit représenter une valeur notable; que dans cette année il n'y a pas eu de transports extraordinaires dus à un éboulement de montagne, à des glissements de terrains, à la rupture de lacs temporaires, etc., catastrophes qui amènent au lac, en quelques heures, des milliers de mètres cubes d'alluvion. J'en puis conclure que le chiffre de 2 millions ^{m3} est un minimum, et que, année moyenne, le transport total de l'alluvion impalpable, sableuse et graviéreuse, doit dépasser notablement cette valeur. Admettons-la simplement comme une valeur minimale.

Cependant, comme nous savons que le transport de l'alluvion grossière du Rhône n'est pas relativement très considérable, nous pouvons nous baser sur ce chiffre pour essayer le calcul de la durée probable du remplissage du creux du Léman. Nous savons que le bassin du Rhône représente les 0.72 du bassin total d'alimentation du lac; nous pouvons, sans trop forcer les analogies, admettre que les affluents directs ont un pouvoir de transport plus ou moins proportionnel à leur superficie, et évaluer, année moyenne,

le transport du Rhône à	2000 mille ^{m3}
le transport des petits affluents du lac à	800 »
le transport total des affluents du Léman à	2800 »

De là, connaissant le volume du Léman, 89 mille millions ^{m3}, une division nous donnera la durée probable du comblement du lac. Nous arrivons à 32 000 ans.

Ce chiffre n'a aucune prétention à la précision; il est basé sur l'étude, bien insuffisante, du transport de l'alluvion impalpable du Rhône d'une seule année, qui nous paraît une année moyenne pour les circonstances météorologiques; il néglige le transport du Rhône en alluvion

grossière, qui n'est certes pas nul. Il ne tient pas compte de la pente des différents affluents qui est un facteur important de leur faculté de transport, ni de leur situation dans une région plus ou moins riche en pluies. Nous avons donc bien des réserves à faire sur la précision que nous pouvons lui attribuer. Peut-être l'erreur commise est-elle du simple au double. Exprimons par E cette erreur. Pouvons-nous dire dans 32 000 ans $\pm E$ le lac Léman n'existera plus et le Rhône du Valais se suivra sans interruption lacustre avec le Rhône de Genève? Aucunement.

Du Bouveret à Genève, la pente est nulle actuellement. Quand le Léman sera comblé et transformé en une plaine du Rhône, la pente du fleuve devra être ménagée. De même que dans la vallée du Valais le Rhône a une pente moyenne de 2 $^{00}/_{00}$, de même la plaine du Léman, quand elle sera parcourue par un fleuve, devra avoir, elle aussi, une pente analogue. Or 2 $^{00}/_{00}$, sur les 72^{km} de longueur du lac, représente 144^{m}. Il faudra donc que le fleuve, non seulement comble le lac jusqu'à la nappe actuelle des eaux, mais qu'il comble en partie la vallée de telle manière, que la plaine du Rhône passe au Bouveret à 144^{m}, disons 150^{m}, au-dessus du niveau actuel. Le plafond régulièrement incliné de la vallée du Rhône de l'avenir passera à 150^{m} au-dessus de Villeneuve, à 130^{m} au-dessus de Vevey; à Lausanne, il affleurera le talus de la terrasse de Montbenon; il passera à 50^{m} au-dessus du lac à Nyon, et viendra se continuer avec la pente actuelle du Rhône à Genève seulement. Nous pouvons évaluer à 43 mille millions ^{m3}, (superficie du Léman, multipliée par 150^{m}, divisée par 2,) le volume d'alluvion nécessaire pour parfaire cette pente indispensable à l'écoulement du fleuve. Cette même pente se continuera en remontant dans le Valais, et la plaine du Rhône se relèvera par un comblement d'alluvion de 150^{m}. Si nous évaluons à 280^{km2} la superficie du plafond de la vallée du Rhône de l'embouchure de la Massa au Léman, nous avons encore un volume de 42 mille millions ^{m3} à faire combler par l'alluvion des torrents alpins, avant que le Rhône puisse amener ses bouches jusqu'à Genève. Cela double à peu près le volume à remplir; cela double par conséquent le temps nécessaire au comblement. Dans 64 000 ans $\pm E'$ nous n'aurons plus de lac.

Je préfère traduire autrement ce résultat et dire : dans quelques dizaines de milliers d'années, le Léman aura vécu. Etant donnée l'incertitude qui pèse sur ces chiffres, et qui peut, je l'ai déjà

dit, les faire varier du simple au double, on se demandera peut-être si ce n'est pas un simple enfantillage que d'essayer de tels calculs. Je ne le crois pas. Ils répondent à des questions toujours posées, et non encore résolues, sur la durée des âges géologiques. Est-ce par siècles? Est-ce par millions d'années que nous devons mesurer les époques de la terre? Disposons-nous d'un temps presque illimité pour les révolutions du globe? ou, au contraire, est-ce que nous devrions raccourcir considérablement les espaces de temps que géologues et paléontologues réclament pour le développement de leur histoire? Tant que nous n'avons pas de réponses précises, nous devons nous contenter d'analogies. Eh bien! il me paraît que c'est trouver une analogie intéressante, si nous pouvons dire : dans quelques dizaines de milliers d'années, ou, si l'on veut, dans quelques fois la durée du temps qui nous sépare des premières dynasties d'Egypte, le Léman sera comblé, et à sa place le Rhône se continuera en pente douce des Alpes au Jura. Une plaine d'alluvion étendra son tapis à 80^{m} au-dessus de la table où j'écris, à Morges. Si, à cette époque, il y a encore des hommes, et s'ils pratiquent des sondages artésiens sur l'axe du lac, ils traverseront une couche de 400^{m} d'alluvion, fluviatile d'abord, fluvio-lacustre et lacustre au-dessous, avant de rencontrer les scories de coke jetées dans l'alluvion actuelle par les fournaises de nos bateaux à vapeur. Une couche allant jusqu'à 400^{m} d'épaisseur, étendue sur des centaines, presque un millier de kilomètres carrés, n'est-ce pas quelque chose, même en géologie? Quelques dizaines de milliers d'années suffiraient à notre petit Rhône alpin pour l'établir.

Eaux et alluvions de l'Arve. — L'Arve n'est pas un affluent du Léman; cette rivière n'appartient donc pas à notre sujet. Mais elle nous est si près voisine, que je crois devoir utiliser un remarquable travail, fait sous la direction de M. le professeur L. Duparc, de l'université de Genève, par M. le Dr Boné Baëff; [1] il donnera une idée des variations d'un grand fleuve glaciaire de notre région. C'est la seule étude complète que nous possédions sur ce sujet; son résumé intéressera nos lecteurs. Pendant une année entière (à l'exception du mois d'octobre où les travaux du laboratoire ont été interrompus par

[1] Dr *B. Baëff.* Les eaux de l'Arve. Recherches sur l'érosion et le transport des rivières torrentielles glaciaires. Genève 1891.

des réparations) en 1890, M. Baëff a chaque jour étudié le régime de l'Arve, en notant, entre autres, les éléments d'un calcul du débit (hauteur de l'eau et vitesse) et en mesurant directement la quantité de matières en suspension et en dissolution. Je tire de ses tableaux les chiffres suivants :

Débit des eaux: Minimum 3.3 m³ sec.
Maximum (1) 437. »

Débit total des 11 mois d'observation (2) 1 570 751 000 m³.

Débit probable de l'année entière, 1700 millions m³.

La superficie totale du bassin de l'Arve étant de 1980 km², ce débit annuel représente une hauteur d'eau de 860 mm étendue sur le bassin d'alimentation.

Transport de l'alluvion impalpable en suspension :

Minimum	0.8 mg litre.
Maximum	3106 »

Transport total de 11 mois, 610 908 tonnes de mille kg.

Transport probable de l'année, 620 mille tonnes.

Transport des matières dissoutes :

Minimum	120 mg litre.
Maximum	319 »

Total des 11 mois, 320 675 tonnes.

Total probable de l'année, 360 mille tonnes.

La quantité totale des matières dissoutes est donc un peu plus de la moitié de l'alluvion impalpable transportée par la rivière. La charge en matières dissoutes varie peu, pas même du simple au triple. Elle est au maximum dans les basses eaux d'hiver, au minimum dans les grandes crues. La charge en alluvion impalpable suspendue varie au contraire beaucoup, comme 1 : 3880 (ou même comme 1 : 6250 si l'on admet le chiffre de 5g par litre, pour l'alluvion transportée par la crue exceptionnelle du 3 octobre 1888, avec un débit de l'Arve de 1136 m³ sec). Elle augmente très rapidement avec les crues de la rivière; elle diminue plus rapidement encore dans la phase de décrue.

(1) Ce chiffre est tiré des tableaux de M. Baëff qui indique comme débit maximal 37 800 000 m³ pour la journée du 31 août 1890. Mais notre auteur parle d'un chiffre bien plus élevé quand il attribue à la crue du 3 octobre 1888 un débit de 1136 m³ sec.

(2) L'année 1890, moins le mois d'octobre.

La température de l'eau a varié de 0 à 15°; au gros de l'été, elle oscille entre 11 et 14°.

La quantité de chlore a été déterminée par moyennes de 5 ou 10 jours. Elle a varié de 1.32 à 2.67^{mg} par litre. En 9 mois, de janvier à septembre 1890, l'Arve a charrié 2530 tonnes de chlore que l'on peut supposer combiné au sodium, ce qui donnerait 4170 tonnes de sel de cuisine, le dixième de la consommation annuelle de la Suisse. La plus forte proportion a été dans les mois d'hiver; la plus faible en été.

Pour tous les détails, nous renvoyons le lecteur au travail original, très important et très intéressant, aussi bien dans les chiffres des observations que dans les déductions ingénieuses de M. le Dr Baëff.

En admettant comme normaux les chiffres ci-dessus indiqués pour le transport probable de l'année 1890, soit 620 mille tonnes d'alluvion suspendue et 360 mille tonnes d'alluvion dissoute, en donnant à ces matières une densité moyenne de 2.6, cela représente un volume de 416 mille ^{m3} qui, répartis sur les 1980^{km2} du bassin d'alimentation, correspondent à 0.21^{mm} de roches enlevées en moyenne à la surface de ce bassin. En 5 ans, il y aurait 1^{mm}, en 5000 ans, 1^{m} de la surface du pays enlevés par l'érosion normale de la rivière.

Théorie du ravin sous-lacustre des fleuves glaciaires.

J'ai décrit dans un autre chapitre (1) les ravins sous-lacustres que les cartes hydrographiques ont révélés dans les cônes immergés du Rhône et du Rhin. (2) Pour ne parler que de celui du Rhône, nous

(1) Page 63.

(2) Des ravins analogues à ceux qui nous occupent ont été signalés dans l'Océan, devant des embouchures actuelles ou d'anciennes embouchures de fleuves. Ils ont des dimensions bien plus considérables que ceux de nos fleuves alpins. D'après la description de M. J.-Y. Buchanan, d'Edimbourg, qui a étudié ceux de la côte occidentale d'Afrique dans l'expédition de *Buccaneer*, le grand canion sous-marin du Congo se prolonge jusqu'à près de 200^{km} en mer; sa tranchée mesure jusqu'à 11^{km} de largeur et a une profondeur au-dessous de ses berges atteignant jusqu'à 1000^{m}. La fosse du petit Bassam, appelée aussi Bottomless pit sur la côte d'Ivoire, probablement devant une ancienne embouchure de l'Akba, a des profondeurs de plus de 400^{m}, une largeur de 7^{km}, et une longueur de 20^{km} environ. Un autre de ces ravins sous-marins, connu sous le nom de fosse de l'Avon, existe à l'est de Lagos, au fond du golfe de Bénin, mais il est moins évidemment développé. Sur les côtes de France, la fosse du Cap Breton, située devant une ancienne embouchure de l'Adour, représente un ravin de plus de 200^{m} de creux,

avons vu que, à partir de l'embouchure du fleuve, sur la ligne de plus grande pente du talus du delta sous-lacustre, on constate une rigole de quelques centaines de mètres de largeur, atteignant jusqu'à 50^{m} de profondeur sous ses berges, se prolongeant jusqu'à 9.5^{km} en avant dans le lac, et visible encore jusqu'à 255^{m} sous la nappe des eaux. A présent que nous connaissons les eaux du Rhône, nous pouvons essayer de faire la théorie de ce curieux phénomène géographique.

Quelle est la cause, l'origine des ravins sous-lacustres du Rhône et du Rhin? Est-ce un fait d'érosion, creusement de la rigole? est-ce un fait d'alluvion, dépôt de matériaux sur les digues latérales? est-ce un fait d'orographie primitive apparaissant encore actuellement sous l'alluvion envahissante des fleuves? J'étudierai ces trois solutions.

Ecartons tout d'abord la dernière de ces hypothèses, en la formulant dans des termes plus précis. On pourrait supposer, dans certaines théories orogéniques que lors, de la formation primitive du lac Léman et du lac de Constance, une fissure profonde des couches terrestres aurait creusé un thalweg au fond de la vallée qui a été remplie par les eaux; que l'alluvion déposée par le fleuve, en adoucissant les reliefs du fond primitif, ne serait pas encore arrivée à les niveler entièrement; que les ravins retrouvés par Hörnlimann seraient les restes encore subsistants de la fissure primordiale. Cette hypothèse me semble insoutenable. ([1]) Sans parler de notre opinion sur l'origine du Léman, qui exclut la supposition d'une fissure primordiale de l'écorce terrestre, les arguments qui la réfutent sont les suivants :

a L'alluvion est trop puissante dans ces régions, à l'embouchure de

de 1 à 2^{km} de largeur, et de 20^{km} de longueur. Citons encore les curieuses vallées submergées que M. A. Issel a constatées devant l'embouchure des rivières de la Ligurie, sur les cartes hydrographiques levées par le capitaine Magnaghi, du *Washington*. Ces ravins sous-marins sont visibles jusqu'à une profondeur de 900^{m}. M. Issel les attribue à une ancienne émersion à l'air libre du terrain qui est aujourd'hui submergé sous la mer.

Je ne donne pas ici la description de ces *fosses* sous-marines qui n'ont rien à faire avec ma monographie; je ne veux pas non plus, ignorant trop les conditions physiques qui pourraient les expliquer, en discuter la théorie, qui est probablement fort différente de celle des ravins sous-lacustres qui nous occupent.

([1]) Elle vient cependant d'être reprise, et non sans éclat, par le professeur L. Duparc (Soc. de phys. de Genève, 4 févr. 1892; Archiv. XXVII, 350); mais les arguments de mon collègue et ami ne m'ont pas convaincu; les théories orogéniques qui nous font comprendre à l'un et à l'autre l'établissement du bassin du Léman sont trop divergentes pour que nous puissions nous entendre sur ce point.

puissants fleuves alpins, qui charrient une masse énorme de limon glaciaire, pour ne pas avoir dès longtemps effacé tous les détails du relief primitif du lac. Je n'en veux pour preuve que la régularité admirable de cet immense talus à pente de 2 $^0/_0$ qui, des bouches du Rhône, s'étend jusqu'à la grande plaine de profondeur maximale du Léman. Les seuls accidents de ce cône d'alluvion submergé sont les ravins qui nous occupent; si le relief primitif de la cuvette apparaissait encore sous le revêtement de l'alluvion moderne, nous y verrions bien d'autres irrégularités.

b La section de plus grand développement des ravins sous-lacustres du Rhône et du Rhin est située tout près de l'embouchure des fleuves; c'est là que se trouve le maximum de creusement de la rigole, le maximum d'exhaussement de ses digues; or c'est précisément là que les phénomènes d'alluvion sont le plus actifs. Puis, à mesure que l'on s'éloigne des bouches du fleuve, là où l'action des courants et de l'alluvion doit aller en s'affaiblissant, on voit le ravin diminuer de relief. L'hypothèse d'une fissure primitive conservée sous le revêtement de l'alluvion moderne, demanderait au contraire le comblement complet du ravin là où l'alluvion est la plus active, et son apparition toujours plus évidente là où les phénomènes de transport vont en décroissant.

c La similitude complète des faits dans les deux exemples connus de ravins sous-lacustres, celui du Rhône et celui du Rhin, exclut la possibilité d'accidents locaux d'orographie primitive qui seraient presque nécessairement différents d'un cas à l'autre. Cette similitude indique une action générale analogue, identique, encore agissante actuellement.

d Enfin les rapports incontestables entre la position des ravins et les embouchures actuelles ou anciennes (1) des fleuves montrent que

(1) Je rappelle ici que, à côté des grands ravins sous-lacustres des bouches actuelles du Rhône et du Rhin, la carte dessine des restes bien reconnaissables de ravins, à demi-effacés, devant le Vieux-Rhône au lac Léman, et devant Altenrhein au lac de Constance.

Une des plus graves objections de la théorie que je défends se tire de l'absence d'un ravin sous-lacustre à l'embouchure de la Reuss dans le lac des Quatre-Cantons; comme je l'ai dit, M. Hörnlimann l'y a cherché avec attention et ne l'a pas trouvé. Cette difficulté serait levée si l'on constatait dans le transport de la Reuss, comme nous l'avons reconnu dans celui de la Drance (qui n'a pas non plus de ravin sous-lacustre) une prédominance de l'alluvion fluviatile grossière sur l'alluvion fluviatile impalpable (page 108 sq.); une forte charge de gros graviers dé-

c'est à une action directe de ces fleuves qu'il faut attribuer le creusement de ces rigoles.

C'est donc aux actions d'érosion ou d'alluvion d'un courant profond que nous devons avoir recours pour expliquer l'établissement des ravins sous-lacustres. Mais une telle action implique que le fleuve descendrait dans les couches profondes du lac et ne s'étalerait pas à la surface, ou bien entre deux eaux. La chose est-elle possible ?

Nous avons vu[1] que la densité de l'eau du Rhône est le plus souvent supérieure à celle du maximum de densité de l'eau distillée. Sur 15 échantillons que nous avons étudiés en 1886, 14 avaient une densité supérieure à 1.0, si nous faisions intervenir à la fois la température de l'eau du fleuve et sa charge en alluvion dissoute et suspendue. Si donc la densité de l'eau du lac n'était pas supérieure à celle de l'eau distillée à 4°, nous serions assurés d'avoir pendant la plus grande partie de l'année l'eau du Rhône plus lourde que celle du lac, même si celle-ci était à la température de 4°.

Mais l'eau du lac n'est pas de l'eau distillée. Sa densité est de 0.000 101 plus lourde que celle de l'eau pure, ainsi que nous le verrons plus loin. Nous apprendrons d'autre part que les couches profondes ont une température de 5° environ.

A 5°, l'eau distillée a une densité de	0.999 995
Ajoutons-y une surcharge de	0.000 101
Nous aurons pour l'eau du lac, dans les grandes profondeurs, une densité de	1.000 096

Si nous comparons cette densité à celle des eaux du Rhône, nous verrons qu'elle est plus faible que celle de 12 des échantillons étudiés par nous; que les N° I du 11 janvier 1886, N° XII du 21 août et N° XIII du 29 septembre, ont seuls une densité plus légère. L'eau du lac est moins dense que l'eau du Rhône pendant la plus grande partie de l'année. Celle-ci, plus lourde, doit s'écouler le long des talus du cône d'alluvion sous-lacustre; elle doit chercher la ligne de plus grande pente jusque dans les grands fonds du lac et, là seulement, s'étaler en nappe horizontale. Pendant cette descente, elle doit former un courant

posés par l'affluent immédiatement à son entrée dans le lac ne permettant pas l'établissement de la structure assez compliquée du ravin sous-lacustre. Je n'ai pas eu l'occasion d'aller étudier l'alluvion de la Reuss; aussi ne puis-je qu'indiquer ici ce point d'interrogation.

(1) V. page 373.

limité, comme le ferait un fleuve de mercure ou d'acide sulfurique qui descendrait dans le lac.

Cette descente du courant du Rhône dans la profondeur du lac, on la voit à son début. C'est ce que l'on appelle la b a t a i l l i è r e. A l'entrée du fleuve dans le lac, en été, lorsque ses eaux grises et opaques arrivent à raison de 300, 400 ou 500 mètres cubes par seconde, cet énorme courant d'eaux froides et lourdes s'avance en masse dans le domaine du lac et, sur un espace de quelque 100 à 200 mètres, s'écoule horizontalement. Puis, tout à coup, le fleuve descend dans la profondeur et ses flots boueux disparaissent sous les eaux du lac. Cette cascade sous-lacustre se continue dans les couches profondes. C'est à elle qu'est dû le ravin que nous avons à expliquer. Comment ce courant limité d'eaux lourdes, qui descend le long du talus immergé du cône d'alluvion, peut-il tracer un ravin?

Est-ce un phénomène d'érosion? Ce courant creuse-t-il la vase molle du cône d'alluvion, et s'y fraie-t-il un chenal? Cela n'est guère probable. Son pouvoir d'affouillement doit être faible, et, dans le lac Léman du moins, le fond de la rigole est à peu près au niveau général du cône sous-lacustre.

Je crois plutôt à un fait d'alluvion. Le courant limité par des masses d'eau dormante doit, en frottant sur ces parois liquides, y déterminer des remous, tourbillons verticaux dans lesquels l'impulsion de l'eau fluviale s'annule et s'arrête; l'eau courante, en se mélangeant avec l'eau en repos, laisse tomber son limon en suspension; il se fait un dépôt d'alluvion sur les deux côtés du courant, et celui-ci bâtit ainsi ses berges qui se surélèvent constamment. Ces digues doivent limiter toujours mieux le courant sous-lacustre et le contenir dans un ravin toujours mieux différencié.

L'existence de ces remous latéraux est prouvée par un détail des sondages de M. Hörnlimann. Un échantillon du sol, que cet ingénieur a capturé sur un petit monticule de la berge de droite du ravin sous-lacustre, est constitué par du sable lavé presque pur, presque sans mélange de vase. Tandis que tous les autres échantillons de sa collection sont formés par la marne argileuse de l'alluvion moderne du lac, dans ce point-là, le sable pur montre l'action de courants énergiques, qui ont entraîné plus loin l'alluvion impalpable, et, dans leurs mouvements tourbillonnants, n'ont laissé reposer que les matériaux grossiers.

Je conclus : le ravin sous-lacustre des fleuves glaciaires est dû à la prolongation du courant fluviatile dans le domaine du lac; ce courant lui-même est dû à la plus grande densité des eaux froides et chargées d'alluvion du fleuve qui tombent au-dessous des eaux plus légères du lac. Des deux côtés du torrent, les remous occasionnent le dépôt de l'alluvion et la formation des digues latérales.

Dans ces termes, je crois résolu le problème qui nous était posé.

La Bataillière.

J'ai indiqué, dans le paragraphe précédent, le phénomène de la bataillière, à l'embouchure du Rhône dans le Léman; j'ai dit comment les eaux du fleuve d'été, entraînées par l'impétuosité du courant, s'avancent dans le domaine du lac à quelques cents mètres de distance, puis, sous l'influence de la pesanteur, par le fait de leur densité plus lourde, plongent tout à coup sous les eaux bleues du lac. Cette cascade sous-lacustre est d'un grand effet; elle mérite d'être étudiée et admirée.

La barre formée à la rencontre des eaux courantes du fleuve et des vagues du lac lorsqu'il est agité, les tourbillons descendants des eaux formant cascade, sont tellement mouvementés que le nom de bataillière (bataille des eaux) semble fort bien justifié. Les petits bateaux doivent user de prudence dans ces flots violemment tourmentés. Au point de vue pittoresque, le spectacle est fort beau. Les eaux grises, opaques du fleuve disparaissent en gros nuages sous les eaux limpides et azurées du lac. L'œil les suit encore quelque temps jusqu'à ce que l'opalescence des eaux lacustres les fasse disparaître au regard. A la surface, la limite entre les deux eaux est parfaitement tranchée; un des côtés du bateau qui navigue sur ces tourbillons est dans l'eau glaciaire, l'autre côté est dans l'eau transparente.

La chute de l'eau fluviale dans le lac est verticale; cela est prouvé par le tourbillon des eaux à la surface; une gigantesque giration, un véritable Maëlstrom fait tournoyer les eaux déprimées sur leur nappe supérieure : il y a aspiration évidente, et cela ne saurait s'expliquer que par une chute verticale de l'eau. Cela est prouvé encore par l'observation suivante. Le 23 février 1891 la bataillière était fort belle, dans un lac au calme plat. Les eaux du lac, autour de la bouche du Rhône, étaient à 4.1° à la surface, à 4.0° par 20^{m} de profondeur; le Rhône qui

s'y déversait était à 3.2°. Par le fait de ces températures relatives, les eaux du fleuve auraient été plus légères que celles du lac; mais la fonte des neiges et des glaces avait commencé, et le Rhône charriait une eau grise, très chargée d'alluvion; sa densité était en conséquence considérablement alourdie, et la cascade sous-lacustre était superbe. Un énorme tourbillon entraînait devant la bouche du fleuve les glaçons qui s'entrechoquaient et désignaient ainsi le lieu de la bataillière. A 20m en dehors du bord de ce tourbillon, les eaux du lac étaient d'une transparence splendide; la plaque blanche que j'ai descendue dans cette eau a pu être suivie par l'œil jusqu'à 17m de profondeur, et, comme nous le verrons plus tard, cette limite de visibilité est bien près du maximum possible dans le lac. Il n'y avait donc aucunement mélange des eaux du fleuve avec celles du lac, et le fleuve s'engouffrait en entier, verticalement, dans la profondeur.

L'entrée du Rhône dans le Léman a souvent été mal interprétée. Les anciens auteurs ont transmis la notion que le fleuve traversait le lac sans y mélanger ses eaux. Voici les citations principales dont je dois la traduction littérale à M. le Dr W. Cart, professeur à Lausanne.

Strabon, géographe grec (de l'an 50 avant J.-Ch. à 30 après J.-Ch.) (1)

« Le Rhône descend des Alpes, fort et violent; traversant le lac » Léman, il montre son courant visible sur plusieurs stades ». (2)

« Le lac Léman, que traverse le Rhône..... »

« Nous avons déjà de la peine à croire cela du Rhône, qui conserve » son courant en traversant le lac Léman, gardant son cours visible; » là, au moins, il n'y a qu'une petite distance, et des eaux tranquilles; » mais dans notre cas (fontaine d'Aréthuse), ce qu'on raconte ne » mérite aucune croyance. »

Pomponius Mela, géographe latin, écrivait vers l'an 43 après Jésus-Christ: (3)

« Le Rhône prend sa source non loin de celles du Danube et du » Rhin. Puis, reçu dans le lac Léman, il conserve son élan et, traver- » sant le lac par le milieu, en restant entier, il ressort aussi fort qu'il » est entré. »

(1) Géographie, 186, 204, 271.
(2) Le stade était de 600 pieds, 200m environ.
(3) De situ orbis, II, 5, 35.

C. Plinius Secundus. Pline l'Ancien, ou le Naturaliste, né l'an 23 de l'ère chrétienne, mort l'an 79 lors de l'éruption du Vésuve : (1)

« Quelques eaux douces aussi passent l'une sur l'autre, comme » dans le lac Fucin la rivière qui y entre, dans le lac de Côme l'Adda, » dans le lac Majeur le Tessin, dans le lac de Garde le Mincio, dans le » lac d'Iseo l'Oglio, dans le lac Léman le Rhône ; ce dernier au-delà des » Alpes, les autres en Italie, n'emportent, dans un trajet de plusieurs » milles, que leurs eaux, qui reçoivent — pour ainsi dire — l'hospita- » lité, et qui ne ressortent pas plus fortes qu'elles ne sont entrées. »

Ammien Marcellin, historien latin, 320-390 après J.-C. : (2)

« Descendant des Alpes Pennines, nourri par des sources abondan- » tes, le Rhône, suivant son élan sur une pente rapide, arrive dans des » lieux plus plats ; il recouvre ses rives de son propre cours et se jette » dans un marais (lac) du nom de Léman ; le traversant, il ne se mêle » nulle part aux eaux extérieures, mais glissant des deux côtés le long » de la surface de l'eau plus tranquille, cherchant une issue, il se fraie » son chemin grâce à son élan rapide. »

De là, la fable qui a traversé le moyen âge et s'est propagée jusqu'à nos jours que le Rhône passerait dans le Léman sans mêler ses eaux à celles du lac. Il me paraît que quelque voyageur aura vu la bataillière et que sa description, embellie par l'imagination du poète, aura rappelé l'histoire de la fontaine Aréthuse, comme le dit Strabon. Cette notion, cette tradition, ayant pénétré dans la littérature, la légende s'est répandue, et rien ne peut plus l'extirper. N'avons-nous pas entendu, en 1879, un membre d'un Institut célèbre déclarer publiquement sa foi dans cette fable : « Il y a trente ans que j'enseigne ce fait à l'école..... Il doit être vrai. »

Le phénomène de la bataillière n'est du reste pas spécial au Rhône. Comme le disait déjà fort bien Pline, il y a 18 siècles, il s'observe partout où les conditions sont analogues ou semblables. Ainsi, à l'entrée dans un lac, tout fleuve alpin chargé d'eau glaciaire, l'Aar dans le lac de Brienz, le Rhin dans le lac de Constance, etc., y fait une bataillière aussi belle que celle du Rhône.

Quand nos rivières de la plaine sont gonflées par les eaux des ora-

(1) Historia naturalis, II, 103. 106.
(2) Rerum gestarum, XV, 11, 16.

ges, elles peuvent avoir des eaux limoneuses plus lourdes que les eaux de la surface du lac; à leur embouchure, il se forme aussi alors une bataillière, comme je l'ai vu parfois à l'embouchure de la Morge dans le lac.

Enfin les eaux des égouts et ruisseaux présentent ce même phénomène, en réduction plus petite encore. C'est ainsi qu'un égout de la ville de Morges me montre souvent ses eaux sales qui s'écoulent lentement sur la beine, en formant une couche grisâtre, opaque, recouverte par les eaux cristallines du beau lac d'hiver.

Dans son très intéressant mémoire sur l'eau dans le paysage, (1) le Dr J. Piccard, professeur à Bâle, étudie entre autres les allures de l'eau dans les cascades, et il montre que l'eau s'y précipite en ondes à renflements transverses. Le phénomène peut s'observer à loisir sur ces cascades d'eau trouble qui tombent dans les eaux claires du lac; la différence de densité étant peu considérable entre les deux eaux, les mouvements y ont une lenteur telle, que l'œil peut les suivre et n'a pas besoin de s'adresser à la photographie instantanée. Ce n'est peut-être pas très facile à voir dans la bataillière du Rhône; le spectacle y est trop violent, et les nuages d'eau laiteuse du fleuve disparaissent relativement trop tôt à la vue. Mais à la sortie d'un égout, comme celui qui débouche à côté du débarcadère de Morges, la cascade d'eaux opaques et lourdes descend assez lentement dans le lac, pour qu'il soit possible de contempler à plaisir les mouvements de l'eau. On voit l'eau grise se sectionner en gros bouillons transverses, en nuages arrondis, ovalaires, qui s'étagent en escaliers dans leur descente paresseuse à travers l'eau transparente. Je ne crois pas que le peintre et le physicien puissent trouver nulle part des conditions meilleures pour étudier les éléments du mouvement du liquide dans les cascades.

La plaine centrale du Léman.

Il nous reste à donner l'explication de l'horizontalité de la plaine centrale du lac. Comme nous l'avons dit, page 48, la partie centrale du plafond du Léman est une plaine de grande étendue, de quelque 60^{km2} de superficie, d'une horizontalité et d'une égalité parfaites; sauf un relèvement très peu marqué sur les bords, les accidents que les son-

(1) Arch. de Genève, XXIV, 561. 1890.

dages ont révélés n'atteignent nulle part un mètre ou même un demi-mètre de dénivellation. Quelle est la cause d'une égalisation aussi complète du fond du lac?

Elle ne tient en aucune façon au relief primitif du sol avant sa submersion par les eaux. Quelle que soit l'action que l'on veuille invoquer, nulle part à l'air libre on ne trouve de cause capable d'uniformiser autant la surface du terrain : le plafond d'une vallée rabotée par un glacier laisse toujours, après la disparition de celui-ci, les accidents des moraines ou des érosions des torrents sous-glaciaires; la plaine d'un désert est érodée par les eaux d'orage et diversifiée par les dunes du vent. Seuls, les fonds de mers, de lacs ou d'étangs peuvent offrir des faits analogues à ceux que nous venons de constater.

C'est l'alluvion qui a fait disparaître les inégalités et accidents du sol primitif de la vallée. Le plafond du lac, dans la région de la plaine centrale, est un produit de cette action. Mais comment l'alluvion peut-elle être assez efficace à une aussi grande distance des embouchures de fleuves et de torrents? Tant que l'on ne pensait qu'à l'alluvion grossière, alluvion de grande puissance, mais qui se dépose seulement à l'entrée de l'affluent dans les eaux stagnantes, ou à l'alluvion lacustre qui se dissémine plus loin, mais dont la quantité est si faible, que pour la supposer capable d'effacer tous les accidents du sol, on était obligé de lui attribuer une durée d'activité indéfiniment longue, l'on était fort embarrassé. Mais depuis que nous connaissons les allures de l'alluvion fluviatile impalpable, qui descend en masse avec les eaux du fleuve dans les grands fonds pour aller se déposer dans les points les plus déclives du plafond du lac, l'explication est toute simple. L'eau du Rhône d'été, chargée de 1 à 2gr de limon par mètre cube, l'eau des affluents gonflés par les crues, plongent dans les grands fonds du lac et opèrent la décantation de leur alluvion impalpable presque uniquement sur le plafond de la cuvette. La quantité de limon qui s'accumule est d'autant plus forte qu'une dépression augmente la hauteur de la colonne d'eau trouble; le dépôt est par conséquent plus abondant dans les creux que sur les parties saillantes. Il en résulte que les creux sont comblés et que le sol s'égalise de plus en plus.

Quand nous arriverons au chapitre des courants du lac, nous verrons comment les mouvements d'oscillation des seiches aident encore à cette action d'égalisation.

IV. Le Rhône de Genève, émissaire du lac.

Le Léman, comme la très grande généralité des lacs d'eau douce, n'a qu'un seul émissaire qui coule à l'air libre; on ne lui connaît pas d'émissaires souterrains. Le Rhône de Genève emmène les eaux du lac à travers la cluse du Vuache, dans la plaine de France, et de là dans la mer Méditerranée.

Il y a dans l'histoire ancienne et moderne de l'émissaire une foule de faits qui intéressent directement ou indirectement le régime du lac; je ne puis avoir la prétention de les décrire tous en détail; mais comme il y est souvent fait allusion dans nombre de dissertations touchant au lac, et en particulier dans celles qu'a provoquées le procès du Léman, je dois résumer de mon mieux les principaux de ces faits, renvoyant aux mémoires spéciaux pour les descriptions plus circonstanciées.

1° *Situation générale. Données géographiques.*

Le Rhône sort du lac en traversant la rade et le port de Genève, il se divise en deux bras autour des îles, se réunit au-dessous d'elles en un lit unique, il reçoit un affluent important, l'Arve, il traverse l'extrémité sud-occidentale de la plaine suisse, passe par la cluse du Vuache, et devient au-delà de Seyssel un fleuve de plaine jusqu'à son embouchure dans la mer. Reprenons ces divers points ; la figure 37 illustrera la description de la traversée de Genève.

A. A mesure qu'il aboutit à Genève, le lac se retrécit graduellement. Il mesure en largeur :

à 4^{km}	de l'île des Barques		3000^{m}.
3	»	»	2500
2	»	»	1750
1	»	»	750

En même temps, sa profondeur diminue. La profondeur du lac est de 45^{m} devant Bellerive, à 6^{km} de Genève; le fond se relève assez lentement, suivant une pente de 11 $^{00}/_{00}$ jusqu'à une barre transversale,

(Fig. 37.) Le Rhône de Genève. Echelle 1 : 12500.

qui est étendue d'une rive à l'autre, de Sécheron au bas de Cologny, et qui forme la limite géographique du lac. Cette barre, connue sous le nom local de Banc du Travers, n'est pas spéciale à Genève; elle existe à la sortie de tous les lacs. Elle est constituée par des sables et des argiles lacustres ; elle est la continuation de la terrasse littorale submergée que nous avons appelée la beine; elle a la même origine que celle-ci et le même mode de formation. Le sol, sur la plus grande largeur du banc du Travers, est actuellement à la cote RPN — 3.7m à — 3.9m ; mais il est coupé par une passe qui se dirige vers l'entrée du port, et où le fond descend jusqu'à RPN — 4.4m. [1] Tandis que la première cote représente celle du seuil géographique, la dernière peut être donnée comme celle du seuil hydrographique du lac ; si le repère de la pierre du Niton est à 376.86m, ce seuil hydrographique est à l'altitude 372.46m. Les eaux moyennes du lac étant à la cote limnimétrique 1.4m, soit à RPN — 1.6m, il y a, aux eaux moyennes, sur la passe du banc du Travers, une profondeur d'eau de 2.8m.

A mesure qu'il se rapproche de son lieu d'écoulement, le lac diminue donc de largeur et de profondeur. Le lit de l'émissaire est donc la continuation naturelle de la vallée du Petit-lac, et non un déversoir accidentel ou latéral, comme par exemple le Rhin de Constance, qui enlève les eaux en dominant la digue de soutien sur la rive gauche du lac.

B. La rade de Genève commence au banc du Travers; elle est actuellement en majeure partie occupée par le vaste port de 33 hectares de superficie, dont les deux belles jetées transversales ont été construites en 1855. Le courant du Rhône traverse le port. Les jetées sont percées de trois ouvertures; la bouche principale a 230m de largeur, les deux petites ouvertures latérales connues sous le nom de goléron n'ont chacune que 4.5m.

Le lac étant à la hauteur de 1.36m, la section mouillée de ces trois ouvertures était en 1882 : [2]

Entrée principale		651.22^{m2}
Goléron des Eaux-Vives		7.3
Goléron des Pâquis		10.4
	Ensemble	668.9^{m2}

[1] Plan de la rade et du port de Genève, levé en mars 1880 par M. Marc Aubin, géomètre, sous la direction de M. E. Merle d'Aubigné, ingénieur ; au 1 : 2000.

[2] Documents de l'Etat de Vaud, Procès du Léman, p. 73, et pl. XXV, 1882

C. Les Iles. Sitôt après sa sortie du lac, le Rhône est divisé en deux bras par deux îles qui partagent son courant.

1° L'île des Barques, île des Bergues ou île Rousseau, au milieu du port. C'était un îlot de sable sur lequel on a bâti un bastion muré, en 1526. (¹) Sa superficie est d'environ 1750^{m2}.

2° L'île de Genève, de forme irrégulière allongée, de 310^{m} de long sur 65^{m} de large, de 1 ½ hectare de superficie, était primitivement un banc d'argiles et de sables sur lequel s'appuyait, aux époques helvéto-romaines, le pont dont parle Jules-César. Une tour est le seul reste du château, bâti par Aymon de Grandson vers 1220. L'Ile est couverte de maisons et de rues; ses bords, jusqu'à présent fort inégaux, ont été régularisés en 1891 par la contruction de quais monumentaux, sur lesquels va s'élever tout un quartier neuf. L'île de Genève sépare le fleuve en deux bras qui sont désignés sous les appellations de bras droit à l'ouest, du côté de St-Gervais, de bras gauche à l'est, du côté de la ville de Genève. La largeur des bras du fleuve a été considérablement modifiée dans les dernières années. Je le montrerai en donnant la largeur minimale, avant et après les travaux de la régularisation du Rhône.

	Avant 1880.	Depuis 1888 .
Bras droit	27^{m}	32^{m}
Bras gauche	25^{m}	38^{m}

D. En aval de l'île de Genève, les deux bras du Rhône se rejoignent et forment un lit unique de 50 à 150^{m} de large bordé à l'ouest par les hautes falaises d'alluvion ancienne de St-Jean, à l'est par la plaine basse de la queue d'Arve.

La chute de l'eau dans la traversée de Genève a été mesurée par MM. Pestalozzi et Legler aux hautes et basses eaux. (²) Ils ont trouvé entre l'entrée du port, limnimètre *A*, et leur règle fluviométrique R^2, située sur le Rhône, à la deuxième roue d'irrigation, rive gauche, à 1200^{m} aval du pont de la Machine :

	Hauteur du lac.	Chute de l'eau.
16 août 1873	2.44^{m}	2.68^{m}
30 mars 1874	0.78^{m}	3.02^{m}

(¹) *Galiffe.* Genève historique et archéologique, I, 144. Genève 1869. La plupart des faits historiques que je vais citer sont tirés de cet ouvrage.

(²) Procès du Léman. Documents de l'Etat de Vaud, pl. XXI, Lausanne 1882.

E. L'Arve se jette dans le Rhône à 2^{km} en aval de l'île des Barques, ou si l'on veut à 2.75^{km} en aval du banc du Travers. L'Arve est une grande rivière alpine à régime glaciaire qui agit puissamment sur le Rhône, fleuve à régime lacustre. Son bassin d'alimentation, d'environ 2000^{km^2}, (1) plus du tiers de celui du Rhône au Bouveret, en fait une rivière à débit considérable; la grande masse des glaciers du Mont-Blanc qui y déversent leurs eaux, lui donne en été un volume d'eau important; ses crues sont très irrégulières et souvent très fortes, et en temps d'inondation elle charrie une masse d'eau énorme et de grandes quantité de galets. Son débit varie de 35 à $625^{m^3\ sec}$ (E. Vallée), ou de 37 à $785^{m^3\ sec}$ (P. Chaix) ; ou de 6 (2) à $1136^{m^3\ sec}$ (B. Baëff.), ou plus exactement de 17 à $1136^{m^3\ sec}$ (C. Butticaz).

Tandis que par les eaux basses et moyennes l'Arve n'agit sur le Rhône qu'en salissant les eaux bleues et limpides que le fleuve emporte loin du lac Léman, en temps de crue et d'inondation, l'Arve a deux effets sur le Rhône, qui se répercutent sur le régime du lac. Ses alluvions de graviers et de galets encombrent le lit du fleuve et tendent à en altérer le canal ; il faut, après chaque crue de l'Arve, que le fleuve se débarrasse par un lent charriage des matériaux qui envahissent son lit. En second lieu, la masse même des eaux de l'affluent barre le cours tranquille du fleuve, le fait refluer, et entrave son écoulement normal vers l'aval. Lorsque l'Arve est en crue, le Rhône est soulevé dans tout son parcours amont jusqu'aux barrages de Genève. C'est ainsi qu'on a vu, dans l'inondation du 2-3 octobre 1888, alors que l'Arve avait subi une crue dépassant en intensité celles des trente dernières années, le Rhône, au-dessous des turbines de la Coulouvrenière, élever son niveau de 2.05^{m}. On a même vu à diverses reprises, dans les siècles passés, l'Arve s'élever assez pour refouler le Rhône, le faire refluer dans le lac, et même, dans des cas extrêmes, déverser ses eaux sales dans le lac. Cela a été noté entre autres :

(1) Plus exactement 1980 k^{m^2} (Boné Baëff.)

(2) Nous corrigeons ici une erreur que nous avons imprimée page 380. Le débit minimal de l'Arve, d'après les observations de M. Baëff, a été de $539\ 000^{m^3}$ en 24 heures, le 6 mars 1890, ce qui représente $6.2^{m^3\ sec}$, et non $3.3^{m^3\ sec}$ comme nous l'avons dit par inadvertance. M C. Butticaz, ingénieur des Eaux de Genève, estime trop faible ce débit minimal de M. Baëff. Il a mesuré directement par des jaugeages complets le débit de l'Arve en temps d'étiage, et n'est jamais arrivé à un chiffre inférieur à $17^{m^3\ sec}$, jaugeage du 17 février 1891.

Le 3 décembre 1570 (Fatio, de Duillier). (1)
Le 21 novembre 1651 id.
Le 10 février 1711 id.
Date incertaine, 1717 (C. Steiger). (2)
Le 14 septembre 1733 (H.-B. de Saussure). (3)

Ce n'est que lorsque les eaux du lac sont très basses que le reflux de l'Arve dans le lac peut avoir lieu; c'est bien ce que l'on a constaté le 2 octobre 1888. A la Jonction, soit au confluent des deux rivières, la hauteur de l'Arve atteignit ce jour-là RPN — 2.03m, d'après les mesures faites à la règle fluviométrique du bâtiment des turbines, laquelle indiquait cette cote le 3 octobre à 4h soir; la pente du Rhône était complètement annulée. RPN — 2.03m correspond à Z L (4) + 0.97m. Pour que ce jour-là l'Arve eût pu refluer dans le lac il aurait fallu que celui-ci fût à une cote limnimétrique inférieure à 0.97m. Nous verrons plus tard au chapitre de la limnimétrie que, dans le siècle passé de telles basses eaux étaient chose normale; elles ne se sont plus représentées que rarement depuis l'année 1860 et ne se représenteront qu'exceptionnellement à l'avenir.

F. En aval du confluent de l'Arve jusqu'à la cluse du Vuache, le Rhône est un fleuve de plaine qui circule dans un lit creusé dans les terrains tertiaires et quaternaires. A la base est la mollasse, au-dessus les alluvions anciennes. Le lit est souvent fort encaissé et les falaises qui le dominent s'élèvent parfois jusqu'à 60 et 80m.

Le Rhône dans ce parcours décrit de nombreux méandres, ou serpentines, quelquefois fort contournés et diversifiés, tellement que du confluent de l'Arve à Chancy, la distance rectiligne n'étant que de 13km, la longueur développée du fleuve dépasse 21km. Ce qui me paraît intéressant dans ces méandres c'est qu'ils découpent tout le lit du fleuve et son encaissement de falaises; c'est ainsi que les méandres de

(1) Loc. cit. [266] p. 464.

(2) Voici ce qu'en dit le bailli de Bonmont, C. Steiger, dans son rapport du 7 janvier 1721. « Il est vrai que l'Arve peut arrêter l'écoulement du Rhône, car il y a trois ans, les eaux du fleuve ont été refoulées par l'Arve au point que les bateaux remontaient d'eux-mêmes vers le lac, et que les roues de moulins marchaient en sens inverse du cours du Rhône. » Cité dans : le Niveau du lac Léman, par un bourgeois de Vevey. Lausanne 1877.

(3) Loc. cit. [p. 29] I, 9.

(4) Z L, comme nous l'avons dit p. 23, est l'étiage du lac, soit un plan passant à 3m en contrebas du repère de la Pierre de Niton.

St-Georges, Aïre, Loëx, Vernier sont creusés dans toute l'épaisseur de l'alluvion ancienne et même en partie dans la mollasse. J'y vois une preuve de l'antiquité de ces méandres; le fleuve était déjà contourné en serpentines lorsqu'il coulait à la surface supérieure de l'alluvion ancienne; il n'a pas redressé son cours lorsque l'érosion des régions aval lui a permis d'approfondir son lit. A mesure que la cluse du Vuache se creusait et que l'érosion progressive rétrograde approfondissait son lit, le Rhône a attaqué plus profondément les couches de mollasse et d'alluvion ancienne sur lesquelles il serpentait primitivement.

Dans ce trajet on trouve plusieurs seuils de roche en place, entr'autres ceux de Vernier, de la Plaine et de Challex, dont nous avons parlé, page 226.

G. Le Rhône au sortir de la plaine suisse traverse la première chaîne du Jura dans la cluse du Vuache, pour arriver dans la vallée longitudinale qui descend du nord au sud, de Bellegarde à Seyssel et Culoz. C'est devant le Fort de l'Ecluse que la vallée traverse les couches néocomiennes et jurassiques perpendiculairement à la chaîne du Vuache. Plus bas en contournant le Credo, le Rhône arrive à la Perte de Bellegarde. La Perte du Rhône est une chute très tourmentée, où le fleuve coulant d'abord sur un banc solide de roches calcaires (urgonien), descend brusquement au fond d'une étroite fissure, un véritable canion creusé dans des roches crétacées tendres. L'érosion du fleuve fait reculer progressivement la chute, et par suite la cluse en amont doit s'approfondir graduellement. Sous ce rapport, la Perte du Rhône et la cluse du Vuache intéressent l'histoire du lac Léman dont l'émissaire a dû suivre les vicissitudes du fleuve aval.

Vallée [1] donne le tableau suivant de la pente du Rhône en aval de Genève :

	Distance	Altitude	Pente $^{00}/_{00}$
Genève	0m	375m	
Moulin de Vaux	5218	367.4	1.5
Bois de Bay	5100	361.0	1.3
Ruisseau de Charmilles	6270	350.1	1.7
Moulin de Charlux	3880	344.8	1.4

[1] *L.-L. Vallée.* Le Rhône et le lac de Genève, p. 19. Paris 1843.

	distance	altitude	pente $^{00}/_{00}$
Frontière (rive gauche)	5250	336.1	1.7
Fort de l'Ecluse	4591	326.5	2.1
Perte du Rhône	8595	308.8	2.1
Bellegarde	2918	297.6	3.8

et pour l'ensemble du cours du fleuve

	Distance	Pente $^{00}/_{00}$
De Genève au Parc (1)	54.3km	1.9
Du Parc à Lyon	163.4	0.7
De Lyon à la mer	327.4	0.5
De Genève à la mer	545.1	0.7

2° *Modifications subies par l'émissaire dans la série des âges.*

Les modifications sont de deux ordres : les unes sont le résultat des faits naturels, érosion et alluvion ; les autres sont le fait des constructions humaines.

A. **Modifications naturelles de l'émissaire.** A la fin de l'époque glaciaire, alors que le pays était encore habité par le mammouth et le renne, le lac Léman était à un niveau plus élevé que de nos jours. Les terrasses fluvio-lacustres que nous trouvons sur les rives du lac le démontrent surabondamment: pendant longtemps le lac était d'une trentaine de mètres au-dessus de sa nappe actuelle (terrasse des Tranchées de Genève, terrasse supérieure du Boiron, de Morges); puis il est descendu d'une quinzaine de mètres (terrasse de Chanivaz, terrasse de la Promenthouse, terrasse moyenne du Boiron, etc.); puis il s'est abaissé au niveau actuel, et il y est arrivé déjà à l'époque des habitations lacustres de l'âge de la pierre. Comme nous le verrons, les faits archéologiques des palafittes indiquent, pour cette époque, un niveau du lac égal à peu près au niveau moderne.

Cet abaissement de la nappe lacustre est le résultat du creusement progressif du lit de l'émissaire; c'est à l'érosion de ce lit qu'il faut attribuer le phénomène. Il est inutile d'invoquer pour cela des soulèvements ou des affaissements locaux, qui ne seraient indiqués par aucune observation connue; il suffit de faire appel à l'érosion progressive de la cluse du Vuache, conséquence du recul progressif de la Perte du

(1) Point terminal de la navigation fluviale, à 12km en aval de Bellegarde.

Rhône. Que cette perte se soit reculée de quelques cents mètres et tout l'approfondissement du lit du Rhône, de Genève à Bellegarde, en sera naturellement résulté. Il est inutile d'insister sur ce fait qui est évident.

L'Arve, depuis qu'elle a existé, s'est toujours déversée dans le Rhône dans la même position géographique, ou à peu près, qu'elle occupe actuellement. Lorsque le lac avait un niveau de 30^{m} plus élevé, le delta fluvio-lacustre de la rivière alpine se jetait, dans le cours principal, un peu plus au nord et déposait la colline des Tranchées de Genève. ([1]) Plus tard, le lit de l'Arve s'est détourné plus au sud et a creusé le lit actuel. Ce qu'on appelle la plaine d'Arve, qui s'étend en aval de la ville de Genève, de la Place-Neuve, Corraterie, route de Carouge, Plainpalais à la Queue d'Arve, etc., semble avoir été creusé par les divagations de la rivière; il est probable qu'à certaines époques l'Arve s'est beaucoup plus rapprochée de Genève qu'elle ne l'est actuellement.

Dans les fouilles faites en 1874 pour la construction du nouveau théâtre, M. le prof. Daniel Colladon a constaté que, sur un banc de glaise à peu près horizontal, il y avait une couche de graviers de 2.1 à 2.5^{m} d'épaisseur ; ([2]) il y a reconnu des graviers de rivière semblables dans leur composition et leur disposition à ceux de l'Arve actuelle. Des briques anciennes, de la forme des briques romaines, indiquaient que le dépôt était d'époque historique. Un nivellement exact de la couche supérieure du dépôt en place lui a attribué une cote d'altitude de 1.42^{m} au-dessus du niveau moyen du lac admis par le général Dufour, Z L + 1.61^{m}, soit, à quelques centimètres près, la cote du repère de la Pierre du Niton, R P N + 0.03^{m}. De là, M. Colladon a conclu qu'à l'époque romaine le niveau du lac aurait été à 2 ou 3^{m} plus élevé qu'il ne l'est de nos jours.

Cette conclusion est assez grave au point de vue du régime du lac, car elle impliquerait entre l'époque lacustre, où le niveau du lac était à peu près le même que de nos jours, et l'époque actuelle, un relèvement temporaire de la nappe du Léman; par conséquent un relèvement temporaire du lit de l'émissaire. Cette conclusion, qui n'est point, que je sache, corroborée par l'existence d'une terrasse correspondante reconnaissable sur les bords du lac, ne me paraît pas suffisamment justifiée. Les sables et graviers de toute la région de Genève

([1]) *D. Colladon.* Archives de Genève, XXXIX, 37, 1870.

([2]) *D. Colladon.* Note sur les dépôts de la rivière d'Arve. Archives de Genève, LI, 139, 1874.

sont d'origine alpine; ceux entr'autres qui constituent la colline des Tranchées ont été apportés par l'Arve. Toute alluvion récente déposée par un torrent ou ruisseau qui aurait érodé ces collines serait donc formée par ces mêmes graviers qui sont aujourd'hui charriés par l'Arve; je ne puis donc voir dans la nature même des sables et graviers une preuve qu'ils auraient été déposés sur place par la rivière à l'époque romaine. Je reconnais qu'il est difficile de juger une question de cette nature sans avoir vu soi-même le terrain, mais c'est la description même donnée par M. Colladon qui m'impose cette objection.

Le lit du Rhône dans la traversée de Genève n'a jamais été sensiblement plus profond que nous le voyons actuellement. Cela résulte du fait que l'on a trouvé de l'argile en place quand on a creusé en 1872 les fondations de l'aile de droite (du côté du bras gauche) de l'ancienne machine hydraulique, en tête de l'Ile, et quand en 1887, on a approfondi et régularisé le bras droit du Rhône. Cette argile bleuâtre, fort uniforme, semblait avoir tous les caractères d'une argile lacustre; elle renfermait cependant quelques blocs erratiques, quelques-uns d'assez gros volume. Quelle qu'en soit la nature, cette argile en place indiquait que le lit du fleuve n'avait jamais été creusé assez profondément pour éroder cette couche.

Quant au banc du Travers, sa hauteur a dû varier avec la hauteur même de la nappe du lac. Si notre interprétation est exacte, si nous ne nous trompons pas en faisant du banc du Travers la suite de la beine qui entoure tout le lac, sa profondeur a toujours dû être de 2 à 3^{m} au-dessous des eaux moyennes. Nous nous fondons en particulier pour affirmer ce fait sur l'identité absolue entre le banc du Travers de Genève et le banc qui se retrouve à la sortie de l'émissaire de tous les lacs, à Thoune, Zurich, Lucerne, Constance, etc. Si le niveau du lac s'élevait, le transport des vagues y déposerait du sable, si le niveau du lac s'abaissait, le courant du fleuve y creuserait une passe plus profonde. La hauteur du sol et la profondeur de l'eau y sont réglées par les conditions du courant, lequel dépend surtout de l'état de l'écoulement aval.

Nous possédons une ancienne carte hydrographique de la rade de Genève et du banc du Travers, levée en 1844 par le général Dufour; la carte du major Pictet de 1880 montre bien quelques différences locales, mais elles sont sans importance; le niveau général est presque exactement le même. Ces deux cartes sont superposées dans la planche I

de la Réponse de l'Etat de Genève dans le Procès du Léman, l'une en chiffres, l'autre en courbes; si l'on trace les courbes isohypses d'après les cotes du général Dufour, on voit qu'elles correspondent à peu près aux courbes du major Pictet. J'y renvoie ceux que cette question peut intéresser.

B. **Modifications artificielles de l'émissaire.** Toute construction établie sur le cours de l'émissaire a son action petite ou grande sur le lac; chaque partie saillante introduite dans le lit du fleuve occasionne un remous des eaux amont, et par conséquent tend à élever les eaux du lac; chaque enlèvement d'obstacle facilite le débit de l'émissaire, et par conséquent tend à amener l'abaissement relatif du lac. Toutes choses égales, cette action est d'autant plus forte que l'obstacle, apporté ou enlevé, est dans un point plus rapproché du débouché du lac. Ces vérités d'évidence justifient l'intérêt ardent avec lequel les riverains du Léman, directement atteints par les variations de hauteur des eaux, ont suivi et surveillé les modifications artificielles apportées dans le lit du Rhône pour satisfaire aux nécessités ou aux intérêts des possesseurs du débouché, ville et habitants de Genève. Ces constructions ont fait, dans les deux derniers siècles, l'objet de discussions souvent trop passionnées. Je me garderai bien de les répéter ici et je me bornerai à résumer rapidement les faits nécessaires à la compréhension des débats auxquels ils ont donné lieu, et surtout à la connaissance du régime du lac.

1° Les *palafittes* ou *stations lacustres* bâties sur pilotis ont, dans les âges archéologiques, couvert toute la beine de la sortie du lac, tout le banc du Travers, à peu près au point où sont les jetées actuelles. D'après les travaux de M. H. Gosse, [1] on trouve des pilotages sur toute la largeur de la rade de Genève. Ces ruines lacustres appartiennent à différents âges, âge de la pierre, âge du bronze, âge du fer, et d'après la localisation des débris de l'industrie humaine que l'on y a repêchés, il n'est pas probable qu'à aucune époque toute la rade ait à la fois été occupée, en entier, par une cité lacustre. Mais les pilotis ont été plantés dans le sol, et l'ont consolidé, fixé sur toute la largeur de la rade, et pilotis et débris d'industrie, pierres et bois ont sans doute

[1] V. *Galiffe*, II, 13.

contribué à arrêter en ce point l'érosion naturelle de l'émissaire. (1) Il est possible que ce soit ainsi l'action de l'homme qui ait arrêté en partie le mouvement général d'abaissement du lac, que nous avons constaté par l'étude des terrasses lacustres, laissées en témoins des anciens niveaux depuis l'époque post-glaciaire.

Nous pouvons attribuer une action analogue aux nombreux débris que, dans le cours des âges, l'homme a jetés dans le fleuve sous les ponts et le long des quais. Non que le pavé protecteur ainsi formé soit capable d'arrêter, de supprimer à lui seul l'action d'une érosion puissante; mais il doit certainement tendre à la modérer. (2)

2° Les *ports* de la ville ont été primitivement la grève du lac et du fleuve, avec un talus incliné auquel venaient accoster les barques marchandes et sur lequel on tirait les bateaux; c'étaient entre autres les ports du Molard et de Longemalle. Vers 1833, on a bâti le port du Commerce sur la place occupée actuellement par le Monument national, jusqu'à la culée méridionale du pont du Mont-Blanc. Il ne mesurait pas plus d'un demi hectare de superficie: il était parfaitement protégé par une jetée coudée qui ne faisait pas plus saillie sur le cours du fleuve que le quai moderne. C'est en 1855 qu'a été construit le port actuel avec ses deux grandes jetées avancées. Nous en avons donné les dimensions, page 393.

3° *Les quais.* Primitivement, le lac à son débouché et le Rhône étaient bordés par des grèves naturelles. Les constructions privées et publiques ont tendu à empiéter progressivement sur le domaine des eaux, et des murs verticaux ont remplacé les talus inclinés des berges. Très accidentés et très irréguliers pendant le moyen âge, avec de nombreux saillants, les murs du rivage ont été progressivement régularisés et forment de plus en plus les courbes élégantes des superbes quais qui font la gloire de Genève. On peut caractériser, au point de

(1) Voyez dans un autre chapitre le paragraphe consacré à l'étude des Ténevières artificielles.

(2) Y a-t-il érosion dans le lit de l'émissaire d'un lac? — Je ne crois pas qu'il y ait érosion mécanique des roches dures, par la raison que l'eau de l'émissaire, étant de l'eau du lac, non chargée de sables, ne saurait attaquer les roches par le procédé d'une lime, comme le fait l'eau grise d'un torrent glaciaire. Mais il y a certainement érosion progressive remontante par affouillement des terrains meubles dans lesquels peut être bâti le lit du fleuve; les sables, les graviers, les argiles même sont creusés par l'affouillement d'un courant rapide.

vue qui nous occupe, la tendance des constructions successives : d'une manière générale, elles ont redressé et rétréci le cours du fleuve.

C'est ce que l'on voit fort bien sur les planches II et III de la Réponse de Genève [1] où l'ancien état des choses, probablement au commencement du XIXe siècle, et l'état moderne, vers 1880, sont superposés en deux couleurs différentes.

Un fait montrera quelles modifications les constructions des quais ont apportées à l'ancien lit du fleuve. Lorsqu'en février 1879 on a creusé les fondations d'une maison de la rue du Commerce, entre la rue du Rhône et les Rues-Basses, on a trouvé dans le sol une douzaine de vieux pilotis, analogues à ceux des anciens palafittes; ils indiquaient, d'après les témoins de la découverte, que le Rhône s'étendait autrefois sur ce point, qui a été séparé du fleuve par toute la rue du Rhône et le quai actuel. [2]

Sur la carte archéologique de M. le Dr H. Gosse [3] où est dessinée la ligne de l'ancienne rive, on voit les modifications importantes apportées à la largeur de l'émissaire par les empiétements des quais modernes. A la hauteur des pierres du Niton, le rétrécissement est d'environ 400^m.

Le Grand-quai de la rive gauche a été construit en 1835.

Le quai des Bergues vers 1838.

Le quai du Mont-Blanc vers 1850.

Les quais des Pâquis et des Eaux-Vives vers 1855.

4° *Les ponts.* Le plus ancien pont dont l'histoire fait mention est cité par Jules César; il traversait l'île de Genève au-dessous de la Tour. [4] Galiffe croyait que ce pont était en pierre, d'une seule venue à travers les deux bras du fleuve. Il paraît plus probable qu'il était en bois et cette opinion me semble corroborée par le fait que dans les fouilles du Rhône en 1884 et 1887 on n'a pas trouvé traces de piles et culées, dont les fondations pour le moins auraient subsisté.

Les ponts qui se sont succédé dans l'Ile de Genève depuis l'époque romaine jusqu'à nos jours ont subi de nombreuses transformations. Dès le XVIe siècle, le pont a été doublé par un second pont, petit pont ou

(1) Procès du Léman, Genève 1880.
(2) *Journal de Genève*, 8 février 1879.
(3) Reproduite en croquis : *Galiffe*, II, 14.
(4) *Galiffe*, I, 28 sq.

pont supérieur qui a été reconstruit en 1740. Entre ces deux ponts, en amont et en aval d'eux, le fleuve, était caché sous un fouillis de constructions diverses, maisons, boutiques, usines, moulins, véritable cité lacustre bâtie sur pilotis. C'était un quartier industriel et marchand, très actif, agité et mouvementé. Il a été le théâtre d'un terrible incendie, le 27 janvier 1670, qui consuma jusqu'à 72 maisons en amont et en aval du Grand-pont du bras gauche. Les ruines et débris de cet incendie encombrèrent le bras du fleuve et « le mirent à sec sur une longueur de 90 m. » Ce dernier fait, qui a souvent étonné, s'explique si l'on fait attention que le désastre eut lieu à l'époque des basses eaux ; que le Rhône, alors à l'étiage, pouvait trouver un cours suffisant par le bras droit. Le pont fut reconstruit peu après, ainsi que les édifices qui l'entouraient, tellement qu'au XVIIIe siècle on l'appelait encore le pont des maisons. Les deux ponts de l'Ile ont été construits à nouveau sur pilotis de fer, vers 1878 ; ils ont été rejoints l'un à l'autre par une vaste plateforme qui en double la largeur.

En 1838, l'on a bâti le pont coudé des Bergues qui s'appuie sur un terre-plein, joint à l'île des Barques par une passerelle.

En 1843, l'on a construit, en amont de la tête de l'Ile, au-devant de la machine hydraulique de 1840, un pont en bois ou passerelle à piétons, connu sous le nom de pont de la Machine. C'est sur les piliers de ce pont que s'appuyait le barrage dont nous parlerons plus tard. Ce pont a été reconstruit en fer de 1884 à 1887.

Le superbe pont du Mont-Blanc a été construit en 1853. Porté sur 12 arches surbaissées, en fer, il traverse le port sur une longueur de 250^{m}.

Le pont de la Coulouvrenière, en aval de l'île de Genève, date de 1857.

Enfin, en 1880, on a établi au bas de l'Ile, à l'entrée des Abattoirs, les passerelles du Marché qui traversent les deux bras du Rhône.

5° Les anciennes *estacades*, soit rangées de pilotis, formaient une quadruple enceinte pour protéger le port et compléter les fortifications du côté du lac. Le premier rang de pilotis fermait le port du côté du lac ; la deuxième estacade complétait la première ; la troisième partait de l'extrémité de l'île des Barques et aboutissait au Jardin anglais actuel, la quatrième partait aussi de l'île des Barques pour se diriger vers les deux rives ; sur le bras gauche elle formait deux angles sail-

lants et trois angles rentrants. Ces énormes pilotis, d'un pied carré de section, unis entr'eux par une triple chaîne de fer, obstruaient environ un tiers du cours du fleuve. (1) Ces estacades ont été arrachées avec grand soin vers 1853, époque de la construction du port actuel.

6° Un grand nombre d'*engins* permanents pour la pêche du poisson étaient établis dans le cours du Rhône, claies, nasses, n a n ç o i r s, etc. Ils ont été enlevés successivement, soit lors de la démolition des estacades, soit lors des réparations faites au barrage de l'Ile ; les derniers ont été supprimés en février 1879.

7° Les *moulins* et usines, bâtis sur le Rhône, en travers de son cours, l'encombraient par leurs agencements compliqués. C'étaient des constructions de bois, souvent à plusieurs étages, établies sur des rangées de pilotis ; ceux-ci, plantés en séries parallèles à l'axe du fleuve, laissaient un passage libre pour l'eau qui faisait tourner les roues à aubes. Ces moulins ont successivement été achetés par la ville de Genève et détruits. (2) Nous avons encore, vers 1850, vu de ces rangées de moulins établis en travers du bras droit du Rhône, en aval du deuxième pont de l'île de Genève.

8° De ces usines hydrauliques, une seule a subsisté jusqu'à nos jours, après avoir subi nombre de vicissitudes et de déplacements ; c'est la *Machine hydraulique* servant à l'alimentation d'eau de la ville de Genève ; elle est la propriété de la Ville. Son histoire est très intimément liée à celle du lac ; la voici en résumé.

La m a c h i n e d e s F o n t a i n e s, comme on l'appelait alors, a été établie en 1713, dans des proportions fort modestes. (3) Bâtie par un ingénieur français, Joseph Abeille, sur le bras gauche du fleuve, à la tête de l'Ile, à 50m environ en aval du pont actuel de la Machine, elle ne portait qu'un seul équipage de pompes. Fort mal construite, elle

(1) Réponse de l'Etat de Genève, Procès du Léman, p. 65.

(2) Réponse de l'Etat de Genève, p. 66.

(3) La date classique de la construction de la première machine hydraulique est 1713 ; cependant E. Merle d'Aubigné qui avait à sa disposition les archives du service des eaux dont il était directeur écrivait à ce sujet : « En 1534, Antoine de Gaillon offrait à la Seigneurie d'établir sur le Rhône moyennant 100 écus et les bois nécessaires, une machine destinée à fournir de l'eau à toute la ville. En 1708, le sieur Abeille de Paris faisait une *nouvelle* machine..... Journal de Genève 24 janvier 1880.

dut être transformée entièrement en 1727 par un Bernois, Maritz. Une roue de 24 pieds de diamètre actionnait les pistons de 6 corps de pompes. En 1740 la machine fournissait 660 litres d'eau par minute.

En 1820, la machine a été reconstruite à nouveau sous la direction de G.-H. Dufour qui en a donné une description détaillée.(1) Une seule roue de 8.15m de diamètre et de 2.52m de largeur mettait en jeu 8 pompes; la force de la machine était évaluée à 27 $^1/_2$ chevaux et la quantité d'eau élevée à 31m de hauteur était en moyenne de 700 litres à la minute.

Vers 1840, la machine a été déplacée et transportée à 20m en amont de l'île de Genève sur le bras droit du fleuve. M. Cordier construisit deux grandes roues Poncelet, à axe horizontal de 6m de diamètre et de 5m de largeur; leur force motrice était évaluée à 25 ou 30 chevaux pour chacune; en bonne marche, la machine débitait 3800 litres à la minute. En 1863, l'on a adjoint dans une aile gauche du bâtiment, soit du côté occidental, une roue Poncelet, remplacée en 1871 par une turbine à axe horizontal construite par Benj. Roy, à Vevey; en 1872, dans l'aile droite, une turbine à axe vertical de Girard et Callon, à Paris. La chute motrice étant aux hautes eaux de 0.90m, la force de ces deux nouveaux engins était évaluée à 41 chevaux en été, et à 77 chevaux en hiver. La construction de ces deux ailes a rétréci d'environ 22m la largeur de la section libre du fleuve sous le pont de la Machine. Le débit total de ces divers engins était évalué en 1880 à un maximum théorique de 10 500 litres par minute en hiver et de 12 500 litres en été; en réalité, ces chiffres s'abaissaient à 7800 et 8300 litres par minute. (E. Merle d'Aubigné.)

Ces machines hydrauliques pompaient l'eau dans le fleuve et l'élevaient à une hauteur suffisante pour l'alimentation d'eau de la ville de Genève et de la banlieue. Le réservoir de distribution était primitivement au sommet du bâtiment de l'Hôtel-de-Ville; depuis 1872, il a été transporté au bois de la Bâtie, où un immense réservoir accumule 5000$^{m^3}$ d'eau pour les besoins de la cité genevoise.

Ces machines hydrauliques étant insuffisantes pour l'alimentation d'eau de la ville, l'on a construit en 1880 une première machine à vapeur, située à la Coulouvrenière sur la rive gauche; elle pompe l'eau amenée par un conduit, qui s'ouvre au milieu du bras gauche

(1) *G.-H. Dufour*. Description et résultats de la machine hydraulique de Genève. Bibl univ., sc. et arts XLV, 412, 1830.

du fleuve, en amont du pont de la Machine. Cette machine à vapeur de 150 chevaux de force est capable d'élever à la hauteur du réservoir de la Bâtie 9000 litres à la minute. Une seconde machine de secours de même force lui a été adjointe en 1881.

Enfin de 1883 à 1887, une transformation complète de système a réglé définitivement, ou pour longtemps du moins, les artifices qui influencent le débit de l'émissaire à la sortie du lac. Un barrage très perfectionné sur le bras droit donne passage libre à l'eau ou l'arrête plus ou moins complètement; le bras gauche est transformé en un bief qui amène l'eau nécessaire au bâtiment des turbines situé à la Coulouvrenière, bien en aval de l'île de Genève, à laquelle il est relié par une digue longitudinale. Des écluses ouvertes soit en amont soit en aval de l'Ile donnent, en cas de nécessité, un passage supplémentaire pour l'eau accumulée dans le bras gauche, et augmentent le débit du fleuve. La chute motrice dont la hauteur varie de 1.68^{m}, avec un débit pour chaque turbine de $13.35^{m^3\ sec}$ aux hautes eaux, à 3.7^{m} avec un débit de $6^{m^3\ sec}$ aux basses eaux, projette l'eau du bras gauche sur les turbines et la fait descendre dans le bras droit. Lorsque les 20 turbines seront terminées, leur débit total variera de 120, régime d'hiver, à $267^{m^3\ sec}$, régime d'été. Les turbines du type Fontaine, modifié par Jonval, ont chacune une force effective de 210 chevaux. La force totale théorique est de 6000 chevaux, donnant 4200 chevaux effectifs sur l'axe des turbines; c'est un rendement de 70 °/₀. — Un tuyau, d'abord en bois, aujourd'hui en fer, va chercher l'eau d'alimentation dans le lac même, au milieu du bac du Travers, et l'amène jusqu'au bâtiment des turbines de la Coulouvrenière.

Les travaux de construction des nouvelles machines hydrauliques de Genève, et ceux de la régularisation du régime du lac ont été brillamment menés à bien sous la direction de M. Turrettini, ingénieur, membre du Conseil administratif de Genève, délégué aux travaux; cette entreprise difficile a été exécutée de 1883 à 1890 par MM. Julien Chappuis et Cie, de Nidau.

Voici les dates principales[1] de ceux de ces travaux qui intéressent le lac.

Dans une première campagne, le bras gauche du Rhône a été fermé par deux bâtardeaux, l'un au-dessus de l'Ile, l'autre en aval du pont

[1] *Th. Turrettini.* Utilisation des forces motrices du Rhône et régularisation du lac Léman. Genève 1890.

de la Coulouvrenière; l'eau contenue dans ce bassin ayant été épuisée, le lit du fleuve a été approfondi et régularisé, les murs des quais reconstruits ou consolidés, le pont de la Machine bâti à nouveau. Le premier pieu du bâtardeau a été fiché le 21 novembre 1883; l'épuisement de l'eau a commencé le 3 mars 1884; le cours du Rhône a été rétabli le 4 août 1884. Dans une seconde campagne, d'août 1884 à avril 1886, on a construit une digue longitudinale partant de l'Ile et aboutissant au bâtiment des turbines pour compléter le bief d'apport des chutes hydrauliques; on a achevé de creuser ce bief entre le pont de la Coulouvrenière et les turbines; on a enfin élevé le bâtiment des turbines, et on l'a meublé de sa machinerie. Dans une troisième campagne, de février à juin 1887, le bras droit du Rhône ayant été barré et son eau épuisée entre deux bâtardeaux, on a approfondi le chenal, régularisé le lit du fleuve, rétabli les murs des quais et construit, sous le nouveau pont de la Machine, le nouveau barrage à rideaux qui doit régler le débit de l'émissaire. Enfin dans une quatrième campagne, de 1889 à 1891, le port de Genève a été dragué, et ses boues, diluées dans l'eau du fleuve, ont été emportées par le courant de l'émissaire. Le 17 mai 1886, une fête solennelle, à laquelle étaient invités les représentants de la Confédération et des cantons intéressés, proclamait l'inauguration de la nouvelle machine hydraulique de Genève et le prochain accomplissement de la régularisation du régime du lac.

Les roues et turbines de ces Machines hydrauliques sont mises en jeu par le courant du Rhône, lequel est modifié par des barrages pour former une chute sous ces artifices.

Le barrage de la machine de 1713 occupait déjà toute la largeur du fleuve; il avait été construit de telle manière que, non seulement il élevât la chute du Rhône, mais encore qu'il relevât la hauteur du lac pendant l'hiver. Voici ce que nous raconte à ce sujet Fatio de Duillier: (1) « Depuis l'incendie du pont du Rhône de Genève, qui arriva le 27 janvier 1670, ce fleuve, resserré dans un canal plus étroit qu'auparavant, avait dans la suite du temps beaucoup creusé et abaissé son lit dans cette ville. Les barques ne pouvaient plus, durant les basses eaux, passer sur le grand Banc (banc du Travers), ni entrer dans le

(1) Loc. cit. [p 266], II, 467.

Port, qu'après avoir été allégées d'une partie de leur charge. Cet inconvénient a été heureusement réparé par le moyen d'une Digue que la République a fait construire au travers du Rhône. Cette Digue est située au haut de l'Ile et au-dessus de la Machine des Fontaines. Elle fut commencée sur la fin de l'année 1713, et elle est faite de manière qu'elle n'empêche pas en été l'écoulement des eaux dont le lac se décharge. Par son moyen, on fait hausser en hiver la surface du lac avec des madriers d'environ un pied et demi. L'on pourrait même, si l'on voulait, élever ses eaux de passé trois pieds. »

Si l'on en juge par la planche II de la Réponse de l'Etat de Genève, (1) ce barrage de l'ancienne machine était situé à environ 50^{m} en aval du barrage de 1840.

Le barrage de 1840 a été construit dans le but d'établir une chute dans le bras droit du fleuve, d'élever les eaux du lac en hiver pour le passage des bateaux sur le banc du Travers, enfin de conserver dans le lac une réserve d'eau suffisante pour le jeu des machines hydrauliques. Il était composé d'un seuil fixe, très complet sur le bras droit, où il faisait saillie de deux ou trois mètres sur le fond, moins élevé et moins complet sur le bras gauche, où il faisait moins saillie sur le sol. Ce seuil fixe était formé par des poutrelles horizontales noyées dans un enrochement de pierres, sans mortier. Son bord supérieur était aux altitudes suivantes :

Sur le bras gauche . . . . . . RPN. — 4.325^{m}.
Sur le bras droit . . . . RPN. — 3.355^{m}.

La passe du banc de Travers étant à RPN — 4.4^{m}, le bord supérieur du barrage de la Machine était plus élevé que le seuil hydrographique du lac de 8^{cm} sur le bras gauche, et de 1.05^{m} sur le bras droit du Rhône.

Sur ce seuil fixe on établissait en hiver un barrage de planches verticales. Vers 1856 on l'a remplacé par un barrage de poutrelles horizontales étendues d'une travée à l'autre du pont; leur épaisseur était de 16 à 22^{cm}, leur nombre variable suivant la profondeur du seuil fixe. (2) Le bras droit, qui servait de canal industriel, était fermé le premier ; quand les eaux continuaient à s'abaisser on fermait aussi le bras gauche du fleuve. L'écoulement ne se faisait plus alors que par les

(1) Procès du Léman, 1880.

(2) Dans l'usage courant le barrage mobile était posé quand le lac descendait au-dessous de la cote de 1.3^{m}.

interstices du barrage qui était peu étanche, et par les chenaux d'alimentation des roues et turbines hydrauliques.

L'entreprise de la régularisation du régime du Léman et de l'utilisation des forces motrices du Rhône, accomplie en 1883-87, a considérablement modifié et amélioré les conditions de l'écoulement du fleuve. Dans les régimes antérieurs à 1820, avec les faibles quantités d'eau réclamées pour l'alimentation de la ville de Genève, la force motrice était toujours surabondante; les barrages avaient pour principale fonction de relever les eaux d'hiver pour faciliter la navigation dans la rade de Genève et pour empêcher l'accès à gué des murailles de la ville. (1) Dans le régime de 1820, et surtout de 1840 à 1880, les nécessités d'eau étaient plus considérables et le barrage augmentant, la hauteur de chute donnait une force plus importante. Le régime actuel de 1884 doit satisfaire aux besoins suivants :

a Donner un libre passage aux hautes eaux pour ne pas occasionner des crues exagérées du lac. La cote conventionnelle pour ces hautes eaux est 1.70^{m}. (2)

b Relever les basses eaux d'hiver de manière à donner une profondeur d'eau de 2^{m} sur la passe du banc du Travers pour les nécessités de la navigation. La cote conventionnelle de ces basses eaux est 1.10^{m}.

c Emmagasiner une réserve d'eau suffisante pour que même par un hiver très sec, le fleuve ait toujours un débit minimal de $120^{m^3\ sec}$ nécessaire au jeu des 20 turbines de la nouvelle usine hydraulique de la Coulouvrenière.

Pour donner satisfaction à ces besoins divers, en même temps que le port et les bras du Rhône ont été dragués à une profondeur convenable, le fleuve a été barré par une digue brisée. Celle-ci part de la rive droite à la place Chevelu, traverse le bras droit sous le pont de la Machine, en comprenant l'ancienne machine hydraulique, puis elle devient longitudinale en rejoignant la tête de l'Ile; elle comprend l'Ile de Genève, la grande digue longitudinale en aval de l'Ile, et enfin le bâtiment des nouvelles usines hydrauliques, pour venir atterrir à la rive gauche à la

(1) Voir à ce sujet l'intéressante étude de M. H. de Saussure, l'Escalade par le lac, dans le Journal de Genève du 12 décembre 1882. La question de la défense de la ville du côté du lac revient souvent dans les rapports des Conseils de Genève du commencement du XVIIIe siècle.

(2) L'étiage du lac est à RPN. — 3.0^{m}.

Coulouvrenière. Cette digue présente les barrages mobiles suivants, qui selon les besoins peuvent être ouverts ou fermés.

1° Le grand barrage du Pont de la Machine, fermé par 39 rideaux mobiles, système Caméré, de 1.12^m de largeur chacun.

La largeur totale de l'ouverture est de 45.50^m

Le seuil est à la cote (1) RPN — 4.50^m

Sa hauteur de retenue aux basses eaux est de 3.30^m

2° Les canaux des roues Cordier et de la machine Callon de l'ancienne usine hydraulique ont leur seuil à la cote RPN — 3.28^m et — 4.74^m

Leur largeur totale est de 18.80^m

3° Les vannes Séchehaye entre l'ancienne usine hydraulique et le haut de l'Ile.

La largeur totale de l'ouverture est 16.40^m

Le seuil est à la cote RPN — 4.50^m

La hauteur de retenue 3.30^m

4° Les vannes de décharge, en aval de l'Ile, entre celle-ci et la digue longitudinale de la nouvelle usine hydraulique.

La largeur totale de l'ouverture est 38.80^m

La seuil est à la cote RPN — 5.35^m

La hauteur de retenue aux basses eaux 4.05^m

5° Les canaux des 20 turbines donnent chacun passage à un volume d'eau évalué

aux basses eaux à 6.0$^{m^3\ sec}$
aux hautes eaux à 13.35 »

Les diverses constructions des temps passés, successivement établies puis enlevées sur le cours du Rhône, ont, chacune à sa manière, influencé le débit du fleuve à sa sortie du lac. L'action était, comme nous l'avons dit, d'autant plus puissante que la construction était plus considérable, qu'elle faisait davantage saillie sur le lit du fleuve, et que sa situation était plus rapprochée de l'origine même de l'émissaire, au banc du Travers. Au point de vue limnimétrique, soit au point de vue de leur action sur le régime du lac et sur la hauteur de ses eaux, nous devons les diviser en deux groupes :

(1) Il est donc de 10^{cm} plus bas que le sommet de la passe du banc du Travers, RPN — 4.4^m.

a Les constructions permanentes modifiant le cours du fleuve pendant toute l'année ;

b les constructions temporaires n'agissant que pendant certaines saisons. A ce groupe appartiennent les barrages mobiles des usines hydrauliques et les claies et engins de pêche.

Les constructions permanentes, en changeant l'aire de section de l'émissaire, ont pour résultat de soulever ou d'abaisser la nappe des eaux d'une manière constante, sans modifier sensiblement la forme de la courbe limnimétrique. Leur action peut se comparer à celle des agents naturels : le dépôt d'alluvion sur le lit de l'émissaire relèverait le niveau du lac comme toute construction artificielle nouvelle ; l'érosion du lit de l'émissaire abaisserait le niveau du lac, comme la suppression d'un obstacle antérieurement existant.

Les constructions temporaires n'agissent sur le régime du lac que pendant leur mise en place ; leur action est intermittente, et, telles qu'elles ont été établies à Genève, elles tendent à transformer le lac en un bassin d'un régime artificiel, en un étang d'usine aménagé pour le service des appareils hydrauliques de Genève. La courbe limnimétrique annuelle est altérée par le jeu de ces barrages mobiles : les hautes eaux ne sont pas sensiblement modifiées, tout au plus ont-elles été rendues un peu plus hâtives ; les basses eaux, au contraire sont notablement relevées.

Cette altération du régime limnimétrique n'étant pas nuisible aux intérêts des riverains, leur étant plutôt favorable, ces modifications artificielles ont été perfectionnées et réglées par la convention du 17 décembre 1884 et les constructions qui en sont résultées. La ville de Genève y a trouvé une meilleure utilisation des forces motrices du Rhône, les riverains du Léman une régularisation du régime limnimétrique du lac, comme nous le verrons plus loin.

On peut se demander quel eût été le sort du Léman si l'homme n'était pas venu s'établir à Genève, et si, dès les premières cités lacustres de l'âge de la pierre, le seuil de l'émissaire n'avait pas été fixé par l'accumulation des débris de l'industrie humaine.

L'érosion dans un fleuve agit en remontant le cours de bas en haut. Toute excavation, toute exagération de pente, dans la partie inférieure du cours d'eau, amène la formation d'un rapide, d'où une érosion plus active du lit du fleuve, d'où le recul de la chute et du rapide, d'où

l'érosion progressive en remontant vers la source. Le Rhône, soit dans la traversée du Jura, soit entre le lac et le fort de l'Ecluse, présente des chutes et des rapides nombreux, — le principal est la Perte du Rhône à Bellegarde — dont les seuils doivent subir ces actions d'érosion et disparaître successivement. A chacune de ces disparitions, l'érosion remontant jusqu'au lac aurait attaqué le barrage de l'émissaire et le niveau du lac se serait abaissé.

Il est vrai qu'un tel abaissement du Léman aurait été entravé considérablement par l'action de l'Arve, dont le cours torrentueux amène dans le lit du fleuve une alluvion grossière, formant barrage. C'est, on se le rappelle, à cette action que j'attribue en partie la situation géographique de l'extrémité terminale du lac Léman. Les alluvions de l'Arve, renouvelées chaque année, auraient-elles eu peut-être une action contraire, auraient-elles tendu à élever le niveau du lac ? Je ne le crois pas et je me fonde sur deux arguments.

Le premier, c'est que, avant l'intervention de l'homme, le niveau du lac allait progressivement en s'abaissant, comme le prouvent les terrasses successives de 30, de 10, de 5^{m} que nous avons constatées sur le pourtour du lac.

Le second argument, c'est que rien, à ma connaissance, n'est intervenu qui se soit opposé à l'action d'alluvion de l'Arve. Si cette action avait été prédominante, elle aurait manifesté son effet par une surélévation progressive des eaux du lac, indépendante des barrages artificiels de Genève. La ville de Genève aurait été progressivement inondée, ce qui n'a pas eu lieu.

Je conclus que probablement l'action de relèvement du lac, due à la fermeture du barrage naturel des alluvions de l'Arve, est inférieure en activité aux actions d'érosion progressive qui abaissent le cours du fleuve, [1] et que les barrages de Genève sont utiles et nécessaires pour maintenir le lac à son niveau actuel. Je suis convaincu que si l'on enlevait de l'émissaire de Genève tous les obstacles, barrages et constructions que l'homme y a accumulés, tous les débris qui tapissent le sol du fleuve, si l'on pouvait rétablir le Rhône naturel qui a précédé l'arrivée des premiers hommes habitant notre pays, bientôt le lit du

[1] M. Th. Turrettini, de Genève, me confirme ces faits; après chaque crue de l'Arve un dépôt plus ou moins considérable de gravier est laissé par la rivière en décrue, dans le lit du Rhône; mais cette alluvion est bientôt enlevée par l'érosion du fleuve, et au bout de quelques semaines il n'en reste rien.

fleuve s'approfondirait assez pour que le niveau du lac s'abaissât de quelques mètres. Une terrasse riveraine resterait sur tout le pourtour du lac comme témoin de la hauteur actuelle du Léman.

L'état des débouchés de Genève intéresse le régime du lac à plusieurs points de vue. Nous ne nous occuperons ici que de quelques-uns d'entr'eux.

3° *Manœuvres du barrage de Genève.*

Les barrages ayant pour fonction d'empêcher les eaux du lac de s'abaisser trop et de gêner ainsi la navigation, d'augmenter aux basses eaux la chute sous les roues et turbines hydrauliques établies sur le Rhône, enfin d'emmagasiner l'eau du lac pour satisfaire à la consommation des machines hydrauliques pendant la période des basses eaux, c'est aux basses eaux que les barrages sont fermés, aux hautes eaux qu'ils sont ouverts. Nous verrons au chapitre suivant que, dans le Léman, les basses eaux ont lieu en hiver, les hautes eaux en été. Pouvons-nous donner des dates plus précises pour les manœuvres du barrage ?

Quant aux régimes antérieurs à 1840, nous n'avons pas à notre disposition de documents qui nous les indiquent ; du reste des dates serrées n'auraient que peu d'intérêt, car les observations limnimétriques de l'époque ne sont pas assez minutieuses pour que nous puissions tirer grand'chose de cette comparaison. (1)

Pour le régime de 1840-1880, nous possédons des notes qui nous ont été communiquées par notre ami E. Merle d'Aubigné, alors ingénieur au service des eaux de la ville de Genève. Nous y voyons que l'opération assez compliquée de la pose des poutrelles du barrage mobile ou de leur enlèvement durait plusieurs jours, souvent plu-

(1) Dans une note de la Cour des comptes de Genève du 27 novembre 1737, il est dit que l'usage était alors d'ouvrir les digues dès le commencement de mars. (Genfer-Buch de Berne, n° 15).

De 1739 à 1751 nous possédons quelques notes sur la date des manœuvres du barrage ; la date moyenne de l'ouverture est le 17 mars (8 années), celle de la fermeture le 19 novembre (12 années) ; le barrage était donc fermé pendant 120 jours environ, soit quatre mois. (Arch. d'Etat de Genève, dossier n° 4666.)

En 1790-92, on ouvrait la digue au mois de mai et même pendant l'hiver, si c'était nécessaire ; d'après quelques cotes indiquées dans la Lettre des syndics de Genève du 29 août 1792, l'ouverture avait eu lieu dans les années précédentes quand l'eau s'élevait aux cotes 34, 42, 38 et 44 pouces de l'échelle du Port-au-bois, ce qui représente les cotes actuelles ZL + 0.92, 1.14, 1.03 et 1.19m.

sieurs semaines. Suivant les nécessités des crues et décrues plus ou moins rapides du lac, elle était avancée ou reculée, pressée ou ralentie. Dans l'usage établi à la suite d'une longue pratique, le barrage mobile était posé lorsque le lac descendait au-dessous de la cote 1.3m. Je me contenterai, pour donner une idée de l'époque de ces manœuvres, de citer ici les dates extrêmes des manœuvres du barrage pendant six années.

	Enlèvement du barrage.	*Etablissement du barrage.*
1871.	20 avril — 22 avril.	7 novembre — 17 novembre.
1872.	2 » — 27 mai.	15 octobre — 23 octobre.
1873.	17 mars — 23 avril.	30 » — 3 novembre.
1874.	1 » — 12 juin.	7 » — 7 »
1875.	4 mai — 20 mai.	9 » — 13 octobre.
1876.	8 mars — 8 avril.	20 » —

D'après ces chiffres, le barrage était fermé de novembre en avril ; il était ouvert de mai à octobre. Pendant six mois la hauteur du lac était artificielle, et le débit de l'émissaire n'avait plus de rapport régulier avec cette hauteur.

4o. *Effet des manœuvres du barrage sur la pente de l'eau dans le port de Genève.*

La nappe superficielle du lac peut être considérée comme étant de niveau jusqu'au banc du Travers. Cette barre étant l'origine géographique de l'émissaire du lac, le fleuve commence sa pente à partir de ce point.

La pente de surface d'un fleuve varie, le long de son cours, suivant la section transverse des profils, soit amont, soit aval ; là où le profil est resserré, il diminue la pente amont et augmente la pente aval ; là où le profil s'élargit, la pente diminue.

La pente superficielle du Rhône dans la traversée de Genève intéresse grandement le jeu des artifices hydrauliques mis en mouvement par le fleuve ; ce point de vue ne nous occupera pas ici. Mais elle intéresse aussi le régime du lac et c'est ce qui nous touche, car tous les appareils limnimétriques de Genève, sauf ceux de Sécheron, sont en aval du banc du Travers, c'est-à-dire dans le fleuve ; pour tirer des observations limnimétriques de Genève des notions exactes sur la hauteur du lac, il faut y apporter une correction annulant la valeur de

la pente. Je ne puis entrer dans des détails trop circonstanciés sur les faits de l'histoire ancienne de ces observations ; je m'en tiendrai à quelques généralités.

1° Plus la règle limnimétrique est située loin du lac en descendant le cours du fleuve, plus la correction de la pente est importante ; c'est ainsi que les limnimètres situés à la machine hydraulique, en tête de l'Ile, sont entachés d'une erreur systématique de la pente plus forte que ceux du port.

2° Pour les limnimètres établis dans le port, limnimètres du Grand-quai, limnimètre du Jardin anglais, les conditions ont notablement changé à l'époque de la construction des jetées du nouveau port (1855). Auparavant la rade était largement ouverte et n'était obstruée que par les rangées de pieux des estacades ; la pente était certainement peu forte. Depuis la construction des jetées, le courant est resserré dans les ouvertures relativement étroites de ces digues transversales, il y a remous amont, augmentation de la pente dans le détroit ; la pente a certainement été augmentée.

3° Avant la construction des jetées de Genève en 1855, la pente entre le lac et le Grand-quai, où était alors situé le limnimètre de Genève, variait peu et avait une valeur moyenne assez faible. C'est ce que je déduis des travaux du colonel Fr. Burnier.[1] Cet excellent physicien avait établi en 1850, dans le port de Morges, une règle limnimétrique sur laquelle il faisait des observations régulières. En 1854 il chercha à en déterminer l'altitude absolue, par une comparaison méthodique avec les observations parallèles faites au limnimètre de Genève. Il supposait que le lac était de niveau entre les deux instruments. Il choisit, dans ces quatre années d'observation, 40 séries de 10 jours, ou décades, pendant lesquelles le lac, presque immobile, lui paraissait dans les meilleures conditions d'horizontalité, et il chercha la différence entre les moyennes de hauteur lues aux deux appareils limnimétriques ; connaissant l'équation du limnimètre de Genève, il en tira l'altitude absolue du zéro de l'échelle de Morges. Pendant ce travail, fait avec beaucoup de soin (j'ai retrouvé dans les registres des observations de Morges la plupart des décades de comparaison et j'ai pu

(1) Sur les limnimètres du lac Léman. Bull. S. V. S. N., IV, 149, 1854.

constater l'attention qui avait présidé à leur choix), Burnier n'a pas aperçu de variations systématiques dans les différences aux hautes et aux basses eaux ; la pente variait évidemment fort peu. — C'est ce que j'ai vérifié en comparant les observations limnimétriques de Genève([1]) et de Vevey ([2]) pendant les années 1851 à 1854. J'en ai pris la différence qui exprime la pente de l'eau. En séparant ces moyennes en deux groupes, l'un des hautes eaux, de juin à octobre, l'autre des basses eaux, de novembre à mai, j'ai trouvé une variation moyenne de 42^{mm} dans la valeur de la pente. Une différence aussi faible a parfaitement pu échapper à Burnier au milieu des variations accidentelles, beaucoup plus fortes.

Ces mêmes recherches de Burnier nous donnent avec une grande sûreté la pente moyenne existant à cette époque. Il avait rapporté, par un nivellement exact, le zéro de son échelle à un repère (la *tache rouge*) inscrit sur les murs du bâtiment de la douane de Morges, et il en avait déduit l'altitude absolue de la tache rouge. Plus tard ce repère ayant été compris dans le nivellement de précision suisse, il s'est trouvé une erreur de 25^{mm} dans la détermination d'altitude de Burnier; cette quantité est la valeur moyenne de la pente du lac que Burnier avait négligée en supposant le lac de niveau. En 1850-54, la pente de l'eau entre Morges et Genève était donc en moyenne de 25^{mm}.

4° Depuis la construction des jetées du port de Genève jusqu'à la fin du régime de l'ancienne machine hydraulique, soit de 1855 à 1883, la pente de l'eau entre le lac et le limnimètre du Grand-quai variait comme suit :

a Par les basses eaux, lorsque le Rhône était fermé, l'eau était relevée par le barrage dans le port et jusqu'au banc du Travers; la section utile du goulet du port dépassant de beaucoup les besoins du débit, le remous des jetées était presque nul et la pente très faible.

b Par les hautes eaux, le barrage étant ouvert, le courant s'établissait librement dans le port et la pente superficielle commençait au banc du Travers; le goulet du port ayant une section suffisante mais non exagérée pour la masse d'eau qui devait y passer, les jetées fai-

([1]) *E. Plantamour.* Notice sur la hauteur des eaux du lac de Genève de 1839 à 1873, p. 20. Geneve 1874.

([2]) *F.-A. Forel.* Contributions à l'étude de la limnimétrie du Léman. Bull. S. V. S. N. XIV 626. 1884.

saient un remous bien marqué, et la pente, entre le lac et le limnimètre du Jardin anglais, était très forte.

c D'une manière générale, la pente augmentait de valeur avec la hauteur des eaux du lac.

Justifions d'abord cette dernière affirmation. Pour trouver la valeur de la pente du lac et de la correction normale à appliquer aux observations de Genève, lorsque nous voulons en tirer la hauteur du lac, j'ai fait une comparaison entre les observations de Vevey et celles de Genève de 1870 à 1875, et j'ai obtenu pour chaque jour la pente du lac. Les différences varient beaucoup et présentent de grandes irrégularités dues aux nombreuses dénivellations de divers ordres qui altèrent l'horizontalité de la nappe du lac ; mais ces irrégularités en sens inverse se neutralisent si le nombre des observations est suffisamment grand, et les lois générales apparaissent bientôt. J'ai ordonné ces différences en séries, suivant la hauteur des eaux du lac, et j'ai obtenu les moyennes brutes de la pente ; j'ai adouci les irrégularités de ces moyennes brutes par un procédé de compensation convenable et j'en ai tiré le tableau suivant, des valeurs moyennes de la pente entre Vevey et le limnimètre du Jardin anglais de Genève pour les différentes hauteurs du lac : (1)

Hauteur du lac.	*Pente.*
2.6^{m}.	85^{mm}.
2.4	75
2.2	65
2.0	55
1.8	45
1.6	36
1.4	28
1.2	20
1.0	13
0.8	10

Telle était la valeur générale de la pente. Mais outre la variation systématique en fonction de la hauteur des eaux, il y avait une varia-

(1) Si quelqu'un avait intérêt à transformer les hauteurs du lac en hauteur de l'eau dans le port de Genève (limnimètre du Jardin anglais) ou vice-versa, pour la période de 1870-75 et les années voisines, il trouvera le tableau détaillé des valeurs de la pente de sortie du lac, dans ma *Limnimétrie du Léman*, Série I, p. 25. Bull. S. V. S. N. XIV. 613. 1877.

tion spéciale due à l'état d'ouverture ou de fermeture des barrages. C'est ce que montrera une comparaison faite sur les observations de Vevey et Genève, de 1871 à 1876, en tenant compte des cas où les barrages étaient ouverts ou fermés. J'en donne les moyennes brutes, non corrigées.

Hauteur du lac.	*Pente.*		
	Rhône ouvert.	Rhône barré.	Différence.
1.7m	58.2mm.	—	—
1.6	40.5	32.2mm	8.3mm
1.5	38.3	29.9	8.4
1.4	37.1	20.7	16.4
1.3	32.0	19.2	12.8
1.2	—	14.3	—

E. Plantamour a fait le même calcul pour les années 1874 à 1880, en utilisant les observations de M. Ph. Plantamour à l'échelle de Sécheron, villa sur la rive droite du lac, à peu près au point d'attache du banc du Travers, donnant par conséquent la hauteur des eaux du lac. Il les a comparées à celles du limnimètre du Jardin anglais et du limnimètre de la machine hydraulique. (1)

	Hauteur du lac.	*Pente de Sécheron.*	
		au Jardin anglais.	à la Machine.
Barrage ouvert.	2.8m	93mm	397mm
	2.4	79	352
	2.0	65	307
	1.6	51	262
Barrage fermé.	1.6	25	84
	1.2	17	43
	1.0	14	22
	0.8	10	—

Ces chiffres qui, pour la même hauteur du lac, 1.6m, faisaient varier la pente de 51 à 25mm et de 262 à 84mm suivant que le Rhône était ouvert ou fermé, montrent l'action considérable qu'avaient les opérations du barrage sur la pente de l'eau dans l'intérieur du port de Genève.

(1) *E. Plantamour.* Remarques sur l'écoulement du Rhône à Genève, p. 9 sq. Genève 1881

La valeur de la pente a varié du reste dans la durée de cette période d'une manière très manifeste. Un tableau complet des observations limnimétriques de Vevey et Genève de 1851 à 1875 m'a permis d'établir de combien chaque jour la pente était plus forte ou moins forte que la moyenne calculée d'après les valeurs de 1870-75 ; j'en ai tiré les moyennes mensuelles de ces différences et enfin les moyennes annuelles. (1) Je me borne à donner ici ces derniers chiffres ; ils signifient, je le répète, que la pente observée, dans l'année considérée, a été de tant de millimètres plus forte ou moins forte que la pente normale, calculée pour les mêmes hauteurs du lac en 1870-75.

Année.	Ecart de la pente.	Année.	Ecart de la pente.
1851	— 25mm	1864	+ 2mm
1852	— 1	1865	+ 21
1853	— 14	1866	+ 21
1854	— 15	1867	+ 24
1855	— 49	1868	+ 5
1856	+ 49	1869	+ 9
1857	— 16	1870	+ 3
1858	+ 14	1871	— 9
1859	+ 34	1872	— 3
1860	+ 67	1873	+ 8
1861	+ 62	1874	— 1
1862	+ 27	1875	+ 1
1863	+ 26		

Si l'on ne s'arrête pas aux irrégularités accidentelles de ce tableau, causées, ou par des erreurs d'observation ou d'appareils, ou par la prédominance de certains vents, si l'on cherche les allures générales du phénomène, on voit très manifestement dans ces chiffres : qu'avant 1856 la pente était très faible, beaucoup plus faible qu'en 1870-75; qu'à partir de 1856 la pente a subi une exagération extraordinaire, qui lui a donné d'abord une valeur dépassant de beaucoup celle des années de comparaison ; puis qu'il y a eu successivement décroissance de cette exagération et retour aux valeurs normales. Nous attribuons cette exagération à l'établissement des jetées du port de Genève, et la diminution ultérieure de l'excès de pente au creusement, par l'érosion, d'un chenal profond à l'entrée du port.

(1) Limnimétrie du Léman. loc. cit. [p. 416] p. 631.

5° Un nouvel état de choses a suivi les travaux de régularisation du régime du Léman en 1883-87. La fermeture du barrage pendant l'hiver est plus complète et les basses eaux ont été notablement relevées : mais le débit d'eau nécessaire au jeu des machines hydrauliques est beaucoup plus considérable ; par conséquent la pente superficielle de l'eau, par le barrage fermé, doit être plus forte que dans le régime précédent. Le port a été dragué ; l'ouverture laissée aux eaux d'été, par l'approfondissement et la régularisation du bras droit du Rhône et par l'abaissement du seuil du barrage, est beaucoup plus considérable ; les gros débits de l'émissaire sont obtenus avec une hauteur beaucoup plus faible des eaux du lac. Par conséquent les mêmes fortes pentes de l'eau, qui étaient autrefois atteintes par un niveau du lac plus élevé, doivent être représentées par ce qui est actuellement le maximum des eaux, quand toutes les vannes du barrage sont ouvertes. Le régime de la pente de la sortie du lac est donc notablement modifié ; il méritera d'être étudié avec attention quand les installations des machines et turbines hydrauliques seront terminées, et que leur jeu aura été réglé d'une manière fixe. Nous avons encore actuellement une période de transition. J'en tirerai cependant quelques faits intéressants.

Pour donner une idée de la pente superficielle de l'eau aux divers mois de l'année, je prendrai les observations de 1889, et j'indiquerai la moyenne de la pente superficielle entre le limnographe de Sécheron et le limnimètre du Jardin anglais ; je donnerai en même temps les moyennes mensuelles de hauteur du lac : (1)

1889.	Hauteur du lac.	Pente de Sécheron au Jardin anglais.	Etat du barrage.
janvier	1.575m	7mm	entièrement fermé.
février	1.396	15	id. id.
mars	1.157	39	partiellement ouvert.
avril	0.956	36	id. id.
mai	1.369	61	largement ouvert.
juin	1.821	47	id. id.

(1) La hauteur du lac au limnographe de Sécheron est tirée d'une note de MM. Th. Turrettini et Ph. Plantamour, Arch. de Genève. XXIII 161. 1890 ; la hauteur de l'eau dans le port, au limnimètre du Jardin anglais, est donnée dans les cahiers mensuels des Archives de Genève.

1889.	Hauteur du lac.	Pente de Sécheron au Jardin anglais.	Etat du barrage.
juillet	1.984m	121mm	entièrement ouvert.
août	1.729	95	id. id.
septembre	1.591	54	partiellement fermé.
octobre	1.695	31	id. id.
novembre	1.670	29	entièrement fermé.
décembre	1.498	11	id. id.

Pour mieux séparer l'effet des ouvertures et fermetures du barrage, j'ai, dans les années 1888 à 1890, choisi des séries d'époques où l'état du barrage était constant et j'en ai pris la pente moyenne de Sécheron au Jardin anglais.

Barrage entièrement fermé.

du 3 janvier au 25 mars 1888	pente moyenne	16mm.
du 1 novembre 1888 au 16 mars 1889	id.	15
du 1 novembre 1889 au 30 avril 1890	id.	12

Barrage entièrement ouvert.

du 1 juin au 30 juillet 1888	pente moyenne	109mm.
du 15 juin au (1) 14 août 1889	id.	118
du 1 juillet au 31 juillet 1890	id.	101
du 1 au 13 août et du 1 au 12 sept. 1890	id.	94

D'après ces chiffres la pente est de 1 ½ centimètres environ quand le barrage est entièrement fermé ; elle est de 10 à 12cm quand le barrage est entièrement ouvert. Mais dans ce dernier état on voit des variations fréquentes et nombreuses qui font élever la pente à 14 et 16cm quand les écluses accessoires, vannes des roues Cordier, vannes Séchehaye, etc., sont ouvertes. Plus le passage est laissé libre à l'eau par les ouvertures d'écluses nombreuses, plus la pente s'exagère entre le lac et le port de Genève. C'est parfaitement compréhensible.

Y a-t-il des relations entre la pente et la hauteur des eaux ? Autrement dit, pour un même état d'ouverture du barrage, la pente est-elle plus forte aux hautes eaux qu'aux basses eaux ? C'est probable ; mais cela ne pourra être démontré que par une étude très attentive des faits locaux, qui tiendra compte, chaque jour, des manœuvres du barrage

(1) A déduire le 31 juillet.

et qui pourra utiliser dans l'intérieur du port un appareil limnimétrique plus parfait que celui du Jardin anglais de Genève. Nous n'avons pas encore les éléments pour discuter cette question.

Je résumerai en un tableau les données à moi connues sur la pente superficielle de l'eau dans le port de Genève. On y verra combien cette pente, essentiellement différente suivant les conditions du barrage de Genève, a varié dans les mêmes conditions aux différentes époques sur lesquelles nous possédons des mesures.

Hautes eaux.	Distance d'un point à l'autre. m.	Hauteur du lac. m.	Pente. mm.
1833, 5 juin. De la Tourelle des Boucheries à la Machine hydraulique. G.-H. Dufour (1)	500	1.54	401
1833, 5 juin. De la Pierre-du-Niton à la Tourelle des Boucheries. G.-H. Dufour (1)	200	1.54	32
1837, 19 août. Du limnimèt. du Grand-quai à la Machine hydraulique. G.-H. Dufour (1)	300	2.47	379
1878-1879. Du limnimètre du Jardin anglais au Pont de la Machine. E. Plantamour (2)	425	2.79	299
1864-1867, juillet. Du Jardin anglais à l'Ile Rousseau. E. Plantamour (3)	250	—	92
1860, hautes eaux. Vevey au Jardin anglais. F.-A. Forel (4)	> 2000	—	160
1875, hautes eaux. Vevey au Jardin anglais. F.-A. Forel (4)	> 2000	—	90
1878-1879, hautes eaux. Sécheron au Jardin anglais. E. Plantamour (2)	1600	2.79	94
1850-1854, hautes eaux. De Morges au Grand quai de Genève (6)	> 2000	2.30	75

Pour les notes, voir à la fin du tableau.

	Distance d'un point à l'autre.	Hauteur du lac.	Pente
	m.	m.	mm.
1874-1880. Sécheron à Jardin anglais, barrage ouvert. E. Plantamour (7)	1600	2.80	93
1874-1880. Sécheron à Machine hydraulique, barrage ouvert. E. Plantamour (7)	2000	2.80	397
1888-1890. Sécheron à Jardin anglais, barrage ouvert. F.-A. Forel	1600	1.7	110
Eaux moyennes.			
1850-1854. De Morges au Gd-Quai de Genève. F. Burnier et F.-A. Forel (6)	> 2000	—	25
1873. De Genthod au Jardin anglais. E. Plantamour (3)	> 2000		56
Basses eaux.			
1823, avril. De la Tourelle des Boucheries au Barrage de la Machine. A. Pichard (1)	500	0.82	390
1838, 1er avril. Du Grand-quai à la Machine hydraul. G.-H. Dufour (1)	300	0.55	203
1878-1879, hiver. Du Jardin anglais à la Machine. E. Plantamour (2)	425	1.22	29
1864-1867, janvier. Du Jardin anglais à l'Ile Rousseau. E. Plantamour (3)	250	—	29
1860, hiver. De Vevey au Jardin anglais. F.-A. Forel (4)	> 2000	—	15
1875, hiver. De Vevey au Jardin anglais. F.-A. Forel (4)	> 2000	—	10
1878-1879, hiver. Sécheron au Jardin-anglais. E. Plantamour (2)	1600	1.22	21
1874-1880. Sécheron à Jardin anglais, barrage fermé. E. Plantamour (7)	1600	0.8	10

	Distance d'un point à l'autre	Hauteur du lac.	Pente.
	m.	m.	mm
1874-1880. Sécheron à Machine hydraulique; barrage fermé. E. Plantamour (7)	2000	1.0	22
1888-1890. Sécheron à Jardin anglais; barrage fermé. F.-A. Forel (5)	1600	1.1	14

5° *Effet des manœuvres du barrage de Genève sur le débit de l'émissaire.*

Si le barrage était situé sur le banc du Travers, début géographique de l'émissaire, l'effet sur le débit du fleuve des manœuvres qui le ferment et l'ouvrent serait évident. S'il était situé à quelques kilomètres aval du lac, son effet sur le lac serait nul. Placé comme il l'est à quelques centaines de mètres sur le cours du fleuve, son effet a souvent été mis en doute ou nié. Il est cependant positif et incontestable. (8)

La chute de l'eau entre le banc du Travers et le pont de la machine est trop faible pour que les manœuvres du barrage ne fassent pas refluer l'eau jusqu'au lac; la fermeture empêche le libre écoulement de l'eau par l'émissaire.

C'est là une vérité d'évidence, actuellement que les barrages donnent une fermeture hermétique telle que leur jeu est celui d'un robinet

(1) *G.-H. Dufour.* Note sur les limnimètres établis à Genève. Bibl. univ. XIII. 152. Genève 1838.

(2) *E. Plantamour.* Réponse de l'Etat de Genève. Annexe 16. Genève 1880.

(3) *E. Plantamour.* Notice, etc., p. 13 et 36. Genève 1874.

(4) *F.-A. Forel.* Limnimétrie, série I. Pour la pente de Vevey au Jardin anglais vers 1860, mes anciens calculs donnaient en été environ 190^{mm}, en hiver 45^{mm}; j'ai réduit ces chiffres à 160 et 15^{mm}, en raison d'une variation signalée dans l'équation du limnimètre de Vevey.

(5) Voir p. 422.

(6) *F.-A. Forel.* Limnimétrie du Léman. V. Bull. S. V. S. N. XVII. 383. 1881.

(7) *E. Plantamour.* loc. cit. [p. 419], p. 9.

(8) Je rappelle ici que la crête du seuil fixe du barrage, dans la période 1840-1883, était sur le bras droit à RPN — 3.35^{m}, sur le bras gauche à RPN — 4.32^{m}, tandis que la passe du banc du Travers était à RPN — 4.4^{m}; le barrage du bras gauche avait son seuil fixe de 8^{cm} plus élevé que le banc du Travers, celui du bras droit de 1.05^{m}. Dans cette période, l'origine du profil en long de l'émissaire n'était donc pas au seuil hydrographique du banc du Travers, mais au seuil artificiel du barrage de la machine hydraulique.

qui ouvre ou qui ferme l'émissaire du lac. Ce n'était pas aussi clair lorsque le barrage était moins parfait que celui de 1885. Les intérêts contradictoires qui se bataillaient sur cette question ont provoqué deux expériences célèbres dans l'histoire du lac.

La première est celle du 13-15 novembre 1821, exécutée sous la direction de G.-H. Dufour et A. Pichard, ingénieurs des cantons de Genève et de Vaud. L'expérience consista dans l'ouverture partielle, pendant deux jours, du barrage qui était auparavant fermé, vu les basses eaux de la saison ; on espérait voir l'effet sur le lac de cette manœuvre extraordinaire. Le barrage de cette époque, à 50^{m} aval du pont actuel de la Machine, avait une longueur totale de 91^{m}, soit 24^{m} sur le bras gauche et 67^{m} sur le bras droit ; on le débarra sur une longueur de 68^{m} en enlevant 5 rangées de poutrelles mobiles, soit une hauteur de 96^{cm} environ. En tenant compte de la durée moyenne des opérations d'enlèvement et posage du barrage, on peut dire que l'ouverture a été effective pendant 41 ½ heures, et pour autant qu'on peut essayer de calculer l'écoulement de l'eau dans des conditions si éloignées de ce que nous connaissons aujourd'hui, le débit extraordinaire de l'eau a dû s'élever ([1]) à environ 16 millions ^{m3}. Si l'on rapporte ce chiffre à la superficie connue du lac, cela n'aurait dû causer qu'une baisse de 28^{mm}, à supposer que l'apport des affluents fût compensé par l'eau passant sous les roues hydrauliques restées en fonction. Or des observations faites à une règle limnimétrique placée au port Tingry, sous Cologny, près Genève, on constata pendant l'expérience une baisse du lac de 1 ½ pouce, soit 41^{mm}.

Cette expérience était pour le moins naïve dans sa conception. Etant connues, ce que l'on ne savait pas alors, les dénivellations incessantes et compliquées de la nappe du lac, il est absolument impossible de conclure d'observations discontinues, faites à une seule règle limnimétrique, à une baisse générale sur l'étendue du lac. Cette expérience n'avait aucune signification.

Une autre expérience d'une toute autre valeur a été ordonnée par les experts du Tribunal fédéral dans le procès du Léman et exécutée du 17 au 26 octobre 1883 par M. l'ingénieur G.-H. Legler, de Glaris ; elle cherchait à mesurer l'effet des manœuvres du barrage, non plus sur le niveau du lac, effet qui serait insaisissable dans le temps trop

([1]) Procès du Léman. Réplique de l'Etat de Vaud, p. 40.

court de l'expérimentation, mais sur le débit du Rhône. Celui-ci a été mesuré directement au moyen du moulinet de Woltmann, sur le profil de la Coulouvrenière, par conséquent en aval du barrage de l'Ile.

Je vais en donner les résultats en indiquant en regard : la hauteur du lac au limnimètre du Jardin anglais (rapportée au limnimètre normal du lac), d'après les observations des Archives de Genève, et celle du lac, au limnimètre du Sécheron, en dehors du port : en marquant aussi l'état des barrages et des vannes des roues et turbines. Les barrages ont été ouverts et fermés ; l'état partiel de fermeture a été indiqué par le nombre de poutrelles posées sur le barrage dans toute la longueur, chaque poutrelle ayant environ 15cm de hauteur.

Jaugeage.	*Date.*		*Hauteur de l'eau.*		*Etat des barrages*			*Débit.*
Nos.	—		*Jardin anglais.*	*Sécheron.*	*Bras droit.*	*Bras gauche.*	*Vannes des roues.*	*m³ sec.*
—	—		—	—				—
17 *bis*	Octobre	22	1.511m	1.562m	fermé	fermé	ouvert	172
18	—	—	1.511	1.562	fermé	fermé	ouvert	156
19	—	23	1.551	1.593	ouvert	ouvert	ouvert	345
20	—	24	1.520	1.578	ouvert	ouvert	ouvert	342
21	—	25	1.548	1.579	2 poutrelles	2 poutrles	ouvert	327
22	—	26	1.570	1.587	6 —	6 —	ouvert	262
23	—	27	1.568	1.597	fermé	fermé	ouvert	179
24	—	—	1.568	1.597	fermé	fermé	fermé	114
25	—	29	1.556	1.593	fermé	ouvert	ouvert	275
26	—	30	1.537	1.583	fermé	3 poutrles	ouvert	278

Dans la description des constructions faites pour l'utilisation des forces motrices du Rhône, (1) ces expériences ayant été appréciées d'une manière qui me paraît erronée, je me crois en droit de les interpréter ici comme je les comprends.

Il s'agissait de rechercher si l'état d'ouverture des barrages avait de l'influence sur le débit du fleuve, et pour cela de comparer le débit du fleuve pour une même hauteur du lac aux différentes fermetures des barrages. Les conditions d'expérimentation n'ont pas été trop mauvaises. Pendant les 8 jours d'expérience, le lac n'a pas varié de hauteur de plus de 35mm, dans les moyennes journalières mesurées au limnographe de Sécheron. Les seiches n'étaient pas trop fortes ; le 24 octobre je les ai observées à la Machine hydraulique et leur ai trouvé une amplitude de 47mm, ce qui pour Genève est un état très modéré.

(1) Un vol. in-4°, p. 118, Genève 1890.

Le résultat général des jaugeages a été le suivant:

		Jaugeage n°
Tous les barrages et vannages des roues et turbines étant ouverts, le débit a été jaugé à	$345^{m3\,sec}$	19
id. id.	342	20
Si l'on posait 2 poutrelles sur toute la longueur du barrage, soit 30^{cm}, le débit descendait à	327	21
Si l'on posait 6 poutrelles, faisant une hauteur de 90^{cm}, le débit descendait à	262	22
Si l'on fermait entièrement les deux barrages en laissant ouvertes les vannes des roues et turbines, le débit n'était plus que	172	17 *bis*
id. id.	156	18
id. id.	179	23
Si l'on fermait enfin les vannes des roues et turbines, le débit descendait à	114	24

Il me paraît que la série est assez correctement décroissante pour que nous y puissions trouver une confirmation du fait élémentaire, que plus le lit de l'émissaire est libre, plus son débit est considérable, plus le lit est fermé par des barrages ou des vannes, plus le débit s'affaiblit.

Mais les auteurs du livre que nous critiquons ne se basent pas sur les résultats des huit jaugeages principaux dont la signification est trop simple. Ils se fondent uniquement sur les jaugeages 25 et 26, dans lesquels les vannages des roues et turbines étant ouverts et la machine hydraulique continuant à fonctionner, le bras droit du fleuve, c'est-à-dire le canal de chute étant fermé, le bras gauche, soit le canal de décharge ou canal de fuite, a été ou bien tout ouvert, jaugeage 25, ou bien barré par deux poutrelles, jaugeage 26. Ces deux jaugeages ont donné à peu près le même débit, 275 et $278^{m3\,sec}$, et les auteurs en ont conclu que la fermeture partielle d'un bras n'altérait pas le débit du fleuve. Il est vraiment curieux qu'ils n'aient pas conclu de ces deux chiffres que la fermeture partielle augmentait le débit du fleuve dans les proportions de 275 à $278^{m3\,sec}$.

La conclusion que je tirerai des irrégularités de ces deux derniers jaugeages est toute autre. Je dirai que la méthode n'est pas assez précise pour que dans les conditions d'expérimentation, en nature, où nous étions placés, dans un port soumis à des dénivellations nombreuses et diverses, avec un débit variable des machines hydrauliques qui tra-

vaillaient pendant l'expérience, on puisse demander une trop grande précision à de telles recherches. J'en ai la preuve dans le fait que le jaugeage 26, opéré par une plus petite ouverture du barrage, a donné un chiffre de débit supérieur à celui du jaugeage précédent nº 25, opéré lorsque le bras gauche était entièrement ouvert. Je pourrais encore donner une preuve bien démonstrative de cette insuffisance de la méthode d'expérimentation dans les trois jaugeages nºs 17 *bis*, 18 et 23; faits dans les mêmes conditions d'ouverture des vannes et écluses, ils ont donné des débits de 172, 156 et 179$^{m3\,sec}$, avec une différence de résultat s'élevant jusqu'à 23$^{m3\,sec}$ entre les extrêmes, soit à 14 $^{0}/_{0}$ de la valeur entière. Ne nous arrêtons donc pas aux petits détails de l'expérience; contentons-nous des grandes lignes générales; elles nous donnent bien les résultats très nets que nous avons indiqués.

Quant à l'allégation très positivement énoncée (¹) que le résultat de ces expériences aurait été jugé par le gouvernement vaudois assez défavorable à ses prétentions pour lui faire changer de ligne de conduite dans le procès du Léman, cette allégation est injuste. Pour autant que nous le savons, ce sont des motifs d'égards et de bon voisinage qui ont guidé, à ce moment, les autorités vaudoises dans leur procédure; quant aux experts et aux conseils techniques vaudois, s'ils avaient eu à tirer des déductions des expériences des 22-26 octobre 1883, ils y auraient trouvé une confirmation très claire du principe que nous avions toujours soutenu : Quand le robinet d'un tonneau est fermé partiellement, il s'écoule moins de vin que quand il est tout ouvert.

J'ai du reste donné en 1880 une démonstration bien simple de l'action des manœuvres du barrage sur le débit du fleuve. J'ai superposé sur la même planche (²) les deux courbes fluviométriques du Rhône, du 14 octobre 1873 au 31 décembre 1874, obtenues par les observations journalières de la hauteur de l'eau au limnimètre du Jardin anglais en amont du barrage, d'une part, et à une règle graduée (limnimètre *K*) situé au pont de la Coulouvrenière, en aval du barrage. Les deux courbes sont suffisamment parallèles tant que le barrage est ouvert; mais, aussitôt que le barrage est fermé, elles s'écartent en indiquant une baisse extraordinaire des eaux aval du barrage; cette baisse

(¹) Répétée et soulignée dans un article de M. E. Lullin, dans le *Journal de Genève* du 14 mai 1890.

(²) *F.-A. Forel.* Limnimétrie du Léman. V. pl. X. Bull. S. V. S. N. XVII, pl XV.

relative des eaux au pont de la Coulouvrenière était, pendant toute la période d'occlusion du barrage, de 30 à 40^{cm}; elle montrait une réduction considérable du débit du fleuve.

De ces faits et expériences, je conclus que le débit de l'émissaire du Léman est influencé par les barrages mobiles posés temporairement sur le cours du fleuve dans sa traversée de Genève ; que depuis l'époque où ces barrages ont été établis (commencement du XVIIIe siècle), le débit du Rhône n'est plus uniquement en fonction simple de la hauteur des eaux du lac, mais que sa valeur est compliquée par les manœuvres du barrage ; que ces irrégularités dans les allures du débit ont été en augmentant à mesure que les barrages ont été plus perfectionnés et ont mieux fermé le cours du fleuve aux basses eaux. Il ne nous sera donc pas possible de déduire, des hauteurs moyennes du lac, la quantité d'eau qui s'écoulait par l'émissaire de Genève.

6° *Débit de l'émissaire.*

La quantité d'eau emportée par l'émissaire a un grand intérêt pour la connaissance du lac. Elle nous apprend, si nous la comparons au volume du lac, quelle est la fraction de ce volume qui est enlevée annuellement, quelle est la durée moyenne du séjour que les eaux du lac font dans ce bassin ; si nous y apportons les notions convenables sur la composition chimique des eaux et sur leur état thermique, elle nous apprend quelle est la masse de substances en solution ou en suspension, quel est le nombre d'unités de chaleur que le fleuve emporte annuellement loin de notre vallée. Au point de vue météorologique elle nous donnera des dates sur la quantité d'eau de pluie ou de neige qui tombe sur le bassin d'alimentation et qui lui est enlevée par l'émissaire.

Le débit de l'émissaire varie de deux manières :

a Avec la hauteur des eaux du lac. Toutes choses égales dans l'état des débouchés, le débit croît en fonction directe de la hauteur des eaux du lac.

b Avec l'état des débouchés. Toutes choses égales dans la hauteur des eaux du lac, le débit croît en fonction directe de la liberté des débouchés, en fonction inverse de leur obstruction. Les rapports trouvés à une époque donnée entre le débit et la hauteur du lac, ne sont

applicables qu'à l'état des débouchés existant à cette époque ; toute modification permanente ou temporaire apportée aux débouchés altère ces rapports.

Les documents sur lesquels nous pouvons nous fonder pour évaluer le débit de l'émissaire sont :

1° Les anciens jaugeages antérieurs à 1873. Je me borne à les énumérer en indiquant les sources et les résultats. Pour la hauteur des eaux du lac, je donne d'une part la lecture originale faite au limnimètre du Grand-quai, d'une autre part la transformation de cette lecture en hauteur du limnimètre normal du lac. Mais je note que c'est la hauteur des eaux dans le port de Genève, au limnimètre du Grand-quai, et que pour avoir la hauteur réelle des eaux du lac, il faudrait encore y apporter la correction de la pente de la sortie du lac, à l'époque des jaugeages. (Voir le § précédent.)

Nos.	*Date.*	*Auteurs.*	*Localité du jaugeage.*	*Lecture au limnimètre du Grand-quai.*	*Hauteur des eaux dans le port de Genève.*	*Débit. m³ sec.*
1	1837, février	? (1)	?	?	?	72
2	1840, septembre 24	De la Rive, Colladon et Dufour (3)	Machine hydr.	62″	1.983	424
3	1841, juillet 26	Goux (2)	Coulouvrenière	82″6‴	2.458	482
4	1852, septembre	Chaix (3)	id.	74″	2.228	532
5	1856, novembre 3	Chaix et Plantamour (3)	id.	21″	0.793	199
6	— décembre 26	E. Vallée (1)	id.	19″8‴	0.739	88
7	1857, mars 23	id. (1)	id.	0.557m	0.78	82
8	1858, mars 4	Chaix (4)	Machine hydr.	15″5‴	0.641	40
9	— juin 30 — juillet 2	Thury (5)	Coulouvrenière	35″ 38″	1.172 1.253	269

2° Les évaluations, ou purement théoriques, ou basées sur les jaugeages, sont les suivantes :

(1) *L.-L. et E. Vallée.* Des eaux... et du barrage de Genève, p. 214. Paris 1859.

(2) *L.-L. Vallée.* Du Rhône et du lac de Genève, p. 82. Paris 1843.

(3) *P. Chaix.* Observations sur le régime de l'Arve et du Rhône. Arch. Genève XXXIV. 55. 1857

(4) *A. Favre.* Recherches (loc. cit. p. 164), I. 14.

(5) *M. Thury.* Sur le jaugeage du Rhône. Bull. S. V. S. N. VI. 220. 1859.

Vallée, en 1859, estimait(1) que le débit du Rhône de Genève variait

de	70m3 sec	aux basses eaux
à	575	aux hautes eaux.

Les calculs de M. Lauterburg (2) lui donnent les valeurs :

minimum extrême	14.1m3 sec
moyenne des basses eaux	82.5
eaux moyennes	270
moyenne des hautes eaux	418
maximum extrême	656

M. l'Ingénieur cantonal de Genève (3) faisait les estimations suivantes :

basses eaux	80m3 sec
eaux moyennes	270
hautes eaux	600

3o Les jaugeages modernes, dans la période de 1873 à 1883, ont été exécutés en vue d'une étude de la régularisation du régime du lac, par MM. C. Pestalozzi, professeur au Polytechnicum de Zurich, Legler, ingénieur de la Linth, à Glaris, et les ingénieurs du Bureau des ponts et chaussées de Lausanne, pour le compte du gouvernement vaudois. Le lieu de jaugeage était à la Coulouvrenière, dans la même localité qu'avait autrefois choisie le général Dufour. La hauteur du lac était mesurée dans le port de Genève, au limnimètre *B* fixé au débarcadère de la rive gauche, en amont du pont du Mont-Blanc, tout près du limnimètre du Jardin anglais ; nous pouvons lui attribuer la même correction de pente qu'à ce dernier, et tirer des lectures qui y ont été faites la hauteur probable des eaux du lac. Voici le résumé de ces jaugeages qui ont tous été faits par la même méthode. (4)

Jaugeage. Nos.	*Date.* —	*Auteurs.* —	*Hauteur de l'eau dans le port de Genève.*	*Débit.* m3 sec.
10	18 août 1873	Pestalozzi et Legler.	2.43m	547
11	20 septembre 1873	id.	1.95	411
12	14 octobre 1873	Gonin, Cuénod, Bernard.	1.51	335
13	4 novembre 1873	id.	1.18	201
14	13 février 1874	Pestalozzi et Legler.	0.80	91
15	18 juillet 1877	Legler.	2.635	641
16	14 février 1882	Legler et Bernard.	0.995	87
17	23 juillet 1883	Guiguer, Amiguet, Grange	2.425	646

(1) Des eaux, loc. cit. [p. 431], p. 97.

(2) Loc. cit. [p. 361] tabl. V, p. 65.

(3) Cité dans *G. Ritter*. Réglementation du niveau du lac Léman. p. 7, Genève 1876.

(4) *Pestalozzi et Legler*, loc. cit. [p. 363]. p. 10.

Ces résultats des jaugeages de Genève ont de l'intérêt à plus d'un point de vue. Ils ont été d'importance capitale dans les débats du procès du Léman et dans l'étude du projet de régularisation du régime du lac et d'utilisation des forces motrices du Rhône ; ces points spéciaux ne peuvent nous occuper ici. En outre, ils nous donnent des notions précieuses sur des faits de grand intérêt limnologique. Je préciserai les problèmes que nous avons actuellement en vue et dont nous chercherons à trouver les éléments :

a Etablir un tableau des débits du Rhône en fonction de la hauteur des eaux du lac, de manière à permettre le calcul pour une époque donnée de la quantité d'eau qui s'écoule à Genève.

b Tirer de ces valeurs le débit annuel de l'émissaire de Genève pour en déduire la quantité d'eau qui, année moyenne, s'écoule du lac, ou ce qui revient au même, de l'ensemble du bassin d'alimentation du Léman.

Un premier coup d'œil jeté sur les chiffres des jaugeages 1 à 17 nous montre que le débit du Rhône croît avec la hauteur des eaux du port et par conséquent du lac ; plus le lac est à un niveau élevé, plus la section utile de son émissaire est forte, plus le débit de celui-ci est considérable. Par conséquent, il semblerait que nous n'ayons qu'à établir ces différents jaugeages en série ordonnée d'après la hauteur des eaux du lac et à en tirer la courbe des débits en fonction de cette hauteur.

Mais ce que nous avons exposé ci-dessus nous fait voir qu'il ne nous est pas permis de chercher une relation simple, applicable à toutes les époques et à toutes les conditions du Rhône, entre le débit du fleuve et la hauteur du lac. Les constructions, successivement établies ou enlevées dans le lit du Rhône, ont trop modifié l'écoulement de l'eau pour que nous puissions rapporter à une époque quelconque les chiffres obtenus dans une époque déterminée, pour que par conséquent nous puissions attribuer aux époques antérieures à 1840 les valeurs que nous donneraient les jaugeages 2 à 9 faits de 1840 à 1858, ou nous fonder pour les époques anciennes sur les jaugeages 10 à 17 exécutés de 1873 à 1883. Il ne nous est possible de comparer ensemble que les jaugeages faits dans la même période, et les valeurs trouvées ne sont applicables qu'à cette période.

En second lieu, les manœuvres des barrages de Genève altèrent les rapports entre la hauteur des eaux du lac et le débit du fleuve : sitôt que les barrages sont fermés, le débit du fleuve est réduit ; plus l'obtu-

ration est complète, plus cette réduction est importante. Nous ne pouvons donc chercher des rapports simples entre la hauteur du lac et le débit de l'émissaire que dans la saison où le Rhône est entièrement ouvert. Cela nous force à n'utiliser dans cette étude que les jaugeages 2, 3, 4 et 9 dans la période de 1840 à 1858, et les jaugeages 10, 11, 12, 15 et 17 dans la période 1873 à 1883.

Si nous les ordonnons en série, nous avons pour la période 1840-58 :

N° du jaugeage	Date Epoque	Hauteur de l'eau dans le port de Genève	Débit du Rhône
3	1841	2.458m	482m3 sec
4	1852	2.228	532
2	1840	1.983	424
9	1850	1.17 à 2.33	269

Les résultats de ces divers jaugeages, faits par des observateurs différents, avec des méthodes et dans des conditions différentes, sont trop divergentes pour être directement utilisables. Du jaugeage n° 3 (1841) au jaugeage n° 4 (1852) nous voyons le débit du fleuve augmenter, tandis que la hauteur du lac était plus faible. Si cette variation n'est pas due à des erreurs d'observation, les conditions de l'écoulement du fleuve avaient trop varié d'une époque à l'autre pour que la comparaison de ces débits nous soit profitable. Noùs serions du reste assez embarrassés pour retrouver dans ces époques anciennes la signification de la hauteur de l'eau mesurée au limnimètre du Grand-quai et pour la rapporter à la véritable hauteur du lac. Nous nous contenterons donc de citer ces jaugeages historiques de la période 1840 à 1858, et nous n'essaierons pas aujourd'hui d'en tirer des valeurs sur le débit du Rhône de Genève.

La seconde série de jaugeages, faits de 1873 à 1883, nous offre de meilleures conditions de sécurité. Exécutés par les mêmes hommes, sur les mêmes profils, avec les mêmes méthodes, leurs résultats semblent bien mieux comparables. Nous pouvons espérer d'en tirer des valeurs utilisables.

Malheureusement, il paraît que les ingénieurs qui ont fait avec toute la précision désirable les observations du débit du fleuve (nous avons vu les feuilles d'observation et les profils de jaugeage ; ils sont établis avec le plus grand soin) n'ont pas donné autant d'attention à l'étude de la hauteur de l'eau dans le port de Genève et à celle du lac. Le plus

souvent nous ne trouvons qu'une seule lecture : pour les jaugeages 10 à 14 cette lecture était faite au limnimètre temporaire *B*, pour les jaugeages 15 à 17 au limnimètre du Jardin anglais. Les auteurs de ce travail ont ignoré alors la grande variabilité de la hauteur de l'eau dans le port de Genève : ils n'ont pas su que, d'un instant à l'autre, par le passage incessant des bateaux à vapeur, par les manœuvres des vannes du barrage de la machine hydraulique, enfin et surtout par les seiches, la hauteur de l'eau varie de quart d'heure en quart d'heure, souvent de quantités importantes, des centimètres, parfois des décimètres ; ils n'ont pas su que pour avoir la hauteur réelle des eaux du lac, base fondamentale de tout leur calcul, ils auraient dû faire faire des observations simultanées, répétées toutes les cinq ou les dix minutes, non seulement dans le port, mais surtout dans le lac, en amont des jetées de Genève, pour tenir compte des oscillations des seiches. L'importance absolue, la nécessité de ces lectures multipliées sera démontrée par le tableau suivant :

Jaugeage n°	Epoque	Echelle *B*	Limnimètre du Jardin anglais	Limnographe de Sécheron.	Limnimètre de Vevey	Hauteur du lac adoptée par F.-A. F.
10	1873	2.43m	2.405m		2.481m	2 481m
11	Id.	1.95	2.005		2.070	2.065
12	Id.	1.51	1.625		1.599	1.665
13	Id.	1.18	1.245		1.275	1.267
14	1874	0.80	0.845		0.873	0.855
15	1877	-	2.635 (¹)	2.725 (²)		2.725
16	1882		0.995 (¹)	1.002		1.002
17	1883		2.425 (¹)	2.503		2.503

Dans ce tableau j'ai mis en présence, pour les jours des jaugeages, les lectures faites :

a au limnimètre *B* de MM. Pestalozzi et Legler, vers le débarcadère des bateaux à vapeur de la rive gauche, à une dizaine de mètres aval du limnimètre du Jardin anglais.

b au limnimètre à flotteur du Jardin anglais, d'après les notes de l'Observatoire de Genève.

(¹) Le même jour les lectures faites au Jardin anglais par les agents des Ponts et chaussées vaudois donnaient :

jaugeage 15	18 juillet 1877	2.635m
— 16	14 février 1882	1.005m
— 17	23 juillet 1883	2.415m

(²) Ce jour-là, 18 juillet 1877, la lecture faite au limnographe de Morges donnait 2.725m. Les différentes observations de hauteur de l'eau sont parfaitement concordantes quand elles sont faites dans le lac lui-même.

c au limnographe de M. Ph. Plantamour, à Sécheron, en amont des jetées, rive droite.

d au limnimètre à flotteur de Vevey ;

toutes ces lectures rapportées par des corrections convenables en valeurs du limnimètre normal du lac (ZL = RPN — 3.0^{m}).

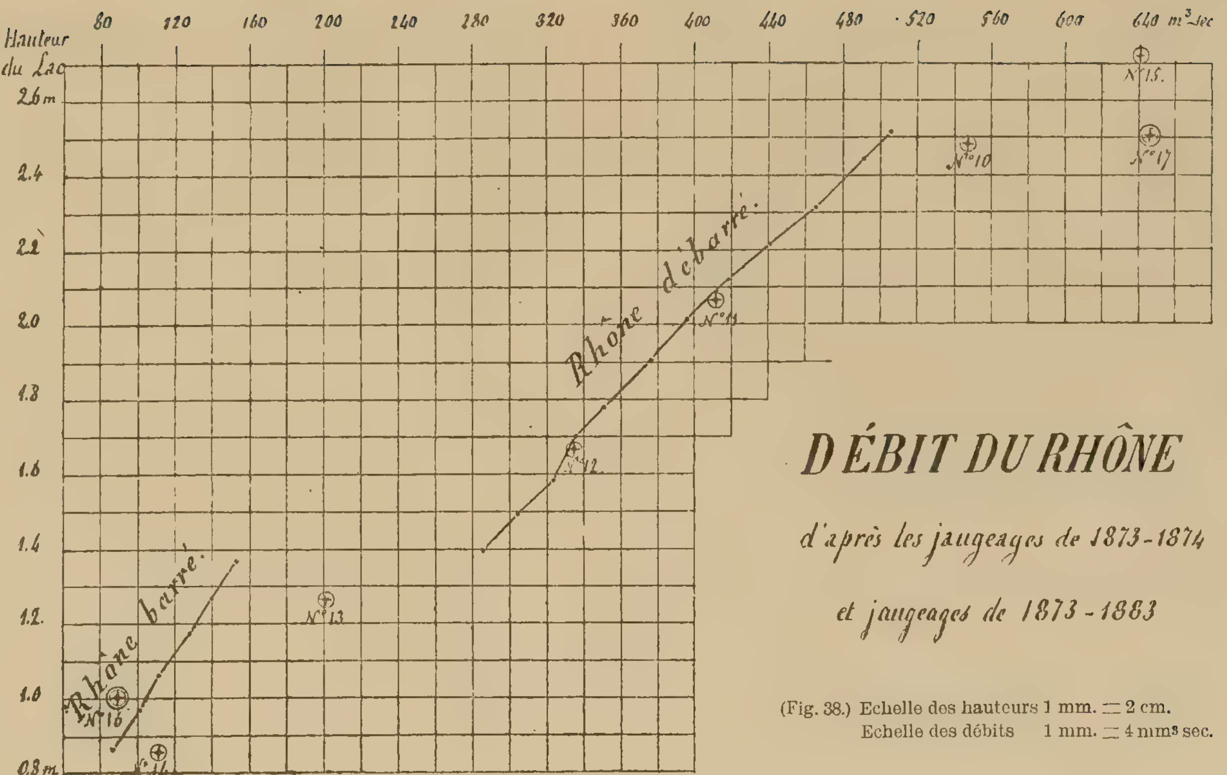
e Dans une dernière colonne, je donne la hauteur probable du lac en dehors des jetées, telle que je la déduis, là où cela est nécessaire, des lectures faites dans le port, en y apportant la correction de la pente de l'eau à la sortie du lac.

L'écart entre les deux premières colonnes est considérable ; il varie de — 2.5 à + 11.5^{cm} ; le limnimètre *B* et celui du Jardin anglais n'étant qu'à quelques mètres de distance, les deux séries de lectures auraient dû donner les mêmes chiffres ; il y avait donc variation rapide et irrégulière de la hauteur de l'eau dans le port de Genève. Je suis donc justifié si je vais chercher, de mon mieux, la hauteur du lac en dehors du port.

Si j'ordonne en séries les jaugeages des ingénieurs vaudois d'après les hauteurs probables du lac en dehors des jetées de Genève, j'obtiens le tableau suivant :

Jaugeage n°	Epoque	Hauteur du lac	Débit du Rhône
15	1877	2.725^{m}	641$^{m3\ sec}$
17	1883	2.503	646
10	1873	2.481	547
11	»	2.065	411
12	»	1.665	335
13	»	1.267	201
16	1882	1.002	87
14	1874	0.855	91

Cette série est assez régulièrement décroissante, si l'on en élimine deux jaugeages, les n°s 16 et 17, faits en 1882 et 1883, tandis que les autres ont été exécutés de 1873 à 1877. On peut admettre que, entre ces deux périodes, il y a eu des modifications assez importantes aux conditions naturelles ou artificielles de l'écoulement du Rhône pour qu'il faille nettement les séparer. Dans la figure 38, où les ordonnées représentent les hauteurs du lac et les abscisses les débits du fleuve, j'ai indiqué par des cercles, avec une croix au milieu, les différents jaugea-



(Fig. 38.) Echelle des hauteurs 1 mm. = 2 cm.
Echelle des débits 1 mm. = 4 mm³ sec.

ges n°s 10 à 17 ; la position des jaugeages n°s 10 à 15 est suffisamment rectiligne pour que je puisse les estimer comparables entr'eux. Les jaugeages n°s 16 à 17 faits à une époque de beaucoup postérieure, sont marqués par un double cercle ; ils sont dans une position très divergente et je proposerai de n'en pas tenir compte.

Vais-je essayer de tracer une courbe entre ces divers jaugeages et en corrigeant ainsi les irrégularités expérimentales d'en déduire le débit du Rhône pour les différentes hauteurs du lac ? Cela serait licite si nous n'avions pas à faire intervenir l'état des barrages de Genève. Comme nous l'avons vu, suivant que les barrages étaient ouverts ou fermés, le débit de l'émissaire était notablement influencé ; les mêmes relations entre la hauteur du lac et le débit du Rhône que nous aurions constatées lorsque les barrages étaient largement ouverts n'existaient plus lorsque ceux-ci étaient partiellement ou totalement fermés. Nous aurions donc à tracer des courbes différentes pour les jaugeages n°s 10, 11, 12 et 15 faits sur un Rhône entièrement débarré, pour le jaugeage n° 13, le Rhône étant partiellement barré, et pour le jaugeage n° 14 le Rhône étant complètement barré. Pour les deux dernières de ces courbes nous n'avons à notre disposition qu'un seul point ; les courbes seraient indéterminées.

Pour ces raisons, j'ai préféré suivre une marche plus compliquée, mais qui m'a permis de faire intervenir un plus grand nombre d'observations pour la détermination des rapports entre les jaugeages du Rhône et la hauteur des eaux du lac et de tenir compte de l'état des barrages. Pendant l'opération des jaugeages, on observait la hauteur des eaux à la règle fluviométrique *Q* établie dans le Rhône à côté du profil des jaugeages à la Coulouvrenière, en aval des barrages de Genève ; par un tableau graphique, j'ai pu relier les débits du fleuve et les hauteurs de l'eau mesurées à cette échelle. Puis j'ai utilisé les lectures journalières faites à l'échelle *A*, du 14 octobre 1873 au 31 décembre 1874, et en les comparant avec les lectures faites simultanément au limnimètre du Jardin anglais, j'ai eu pour chaque jour le débit du fleuve rapporté à la hauteur de l'eau dans le port ; la correction de la pente de la sortie du lac m'a donné pour ces mêmes valeurs la hauteur des eaux du lac en dehors des jetées de Genève. J'ai divisé les observations en deux séries, comprenant, l'une, la période où le Rhône était entièrement libre, tous les barrages mobiles étant enlevés (du 14 au 30

octobre 1873 et du 12 juin au 7 octobre 1874), l'autre, la période où le Rhône était entièrement barré (du 9 novembre 1873 au 1er mars 1874 et du 8 novembre au 31 décembre 1874) ; puis j'ai groupé mes chiffres en les ordonnant par décimètres de hauteur d'eau, et j'ai obtenu ainsi le tableau suivant : (¹)

Etat du barrage.	Nombre d'observations.	*Hauteur de l'eau.* Jardin anglais.	Lac.	Débit du Rhône.
	6	2.434m	2.517m	505m3 sec
	17	2.364	2.443	491
Rhône ouvert	18	2.241	2.314	465
	10	2.147	2.215	440
	14	2.059	2.122	418
	8	1.960	2.018	396
	11	1.853	1.905	376
	12	1.734	1.780	351
	16	1.662	1.704	336
	4	1.548	1.584	324
	5	1.462	1.494	304
	7	1.366	1.394	286
Rhône barré.	20	1.343	1.370	153
	37	1.245	1.268	139
	39	1.156	1.175	128
	27	1.053	1.068	112
	17	0.958	0.970	101
	21	0.856	0.867	87

Je traduis ces chiffres dans le tableau graphique de la fig. 38, qui donne des résultats assez satisfaisants ; les courbes, brisées par les irrégularités des observations individuelles, peuvent être facilement redressées en courbes normales. J'ai porté sur le même tableau les chiffres donnés par les jaugeages isolés ; cinq d'entr'eux rentrent assez suffisamment dans les courbes ; en revanche, le jaugeage n° 13 du 4 novembre 1873 appartient à une courbe intermédiaire ; il a dû être fait alors que le Rhône était partiellement ouvert ou partiellement fermé ; puis les jaugeages 15 à 17 divergent très notablement, le dernier surtout en donnant un débit trop grand pour la hauteur du lac observée ;

(¹) Je ne donne pas ici les chiffres intermédiaires ni le détail des calculs ; on pourra les retrouver dans ma Limnimétrie du Léman. Ve série. Bull. S. V. S. N. XVII. 369 sq.

ce dernier jaugeage fait en 1883 a peut-être rencontré des conditions de l'émissaire notablement différentes de celles de 1873. Dans l'impossibilité où je suis de faire rentrer ces deux derniers jaugeages dans le rang, j'en suis réduit à devoir déclarer qu'il y a dans mon tableau incertitude sur les débits du Rhône quand le lac dépasse les cotes de 2.4 ou 2.5m.

Quoi qu'il en soit, en régularisant par une courbe moyenne les irrégularités des observations accidentelles, j'admettrai pour les années 1873 et 1874, et pour les années voisines, les débits du Rhône rapportés à la hauteur du lac que voici :

Hauteur du lac.		Débit du Rhône.	Hauteur du lac.		Débit du Rhône.
2.5m	barrage ouvert,	510m3 sec	1.5m	barrage ouvert,	302m3 sec
2.4	—	480	1.4	—	282
2.3	—	456			
2.2	—	437	1.4m	barrage fermé,	157m3 sec
2.1	—	418	1.3	-	144
2.0	—	398	1.2	—	131
1.9	—	380	1.1	—	117
1.8	—	360	1.0	—	105
1.7	—	340	0.9	—	91
1.6	—	320	0.8	—	77

Dans la période nouvelle, depuis la régularisation du régime du lac, depuis l'organisation des engins de 1883-1887, qu'avons-nous à notre disposition pour le débit du lac ?

Dans ce nouvel état de choses, l'occlusion du Rhône est parfaite lorsque tous les barrages sont fermés ; le libre passage de l'eau est assuré lorsque les barrages sont ouverts. Il semblerait donc que l'on puisse établir des rapports simples entre la hauteur du lac et le débit de l'émissaire dans ces deux états des barrages. Mais dans la pratique jusqu'à présent adoptée, les faits sont plus compliqués. Dans le régime des grandes eaux, le barrage à rideaux est ordinairement tout ouvert ; mais à côté de cela les vannes accessoires, écluse Séchehaye, vannes de l'ancienne machine hydraulique, sont tantôt ouvertes ou fermées : il est bien peu de jours où le directeur des eaux de Genève n'ordonne quelque modification à l'état du barrage. Dans le régime des basses

eaux, l'état du barrage est beaucoup plus constant et l'on pourrait facilement établir les relations d'écoulement en fonction de la hauteur du lac ; mais cela n'aurait que peu d'intérêt.

Je me contenterai donc de donner d'après les calculs de M. Legler le débit du Rhône par le barrage à rideaux du bras droit du fleuve toutes vannes ouvertes. La hauteur de l'eau dans le port de Genève est mesurée au limnimètre du Jardin anglais.

Hauteur de l'eau dans le port de Genève.	Débit du Rhône par le bras droit du fleuve.
1.9^{m}	338$^{m3\ sec}$
1.6	297
1.3	259
1.0	221
0.7	182
0.4	146

Ces chiffres ne donnent ni les quantités d'eau qui s'écoulent par les turbines de la machine hydraulique, ni celles que débitent les vannes accessoires (écluses Séchehaye, roues Cordier, écluse de décharge) ; ces quantités sont essentiellement variables, et il serait trop long de chercher ici les formules qui les représentent.

Il faut donc renoncer à trouver dans l'état actuel des choses une relation simple entre la hauteur du lac et le débit de l'émissaire. Le Léman est aujourd'hui un étang d'usine dont le régime est artificiellement réglé par les intérêts et les nécessités des machines hydrauliques de Genève ; la hauteur de ses eaux n'est plus régie par le jeu libre des faits naturels. Je ne m'en plains pas, je le constate.

Il est cependant facile de trouver le débit de l'émissaire. Des observations fluviométriques sont faites journalièrement à une échelle située en aval du barrage, au-dessous de l'usine hydraulique de la Coulouvrenière. Des jaugeages, mesures directes et calculs de MM. Turrettini et Butticaz, ont donné les éléments d'un tableau graphique où le débit du Rhône est indiqué en fonction de deux éléments variables : de la hauteur de l'eau à l'échelle fluviométrique aval des turbines et de la pente de l'eau dans le fleuve, entre les turbines et le confluent de l'Arve. Cette pente est si faible depuis que le lit du Rhône a été dragué et régularisé — sur une longueur de 1000^{m} environ, elle n'est que de 20^{cm} aux basses eaux, de 50^{cm} aux hautes eaux — que sa valeur est d'influence considérable sur le débit du fleuve. Ce tableau, dont les

bases fondamentales sont encore actuellement à l'étude, permettra, quand il sera définitif, une évaluation très simple et parfaitement exacte des quantités d'eau qui s'écoulent hors du Léman. Ce sera un travail de longue haleine, et dont les résultats ne seront à notre disposition que dans les années à venir. Les chiffres que nous allons donner d'après les premières années d'étude montreront le grand intérêt qui sortira de ce travail.

Essayons maintenant d'utiliser ces chiffres actuellement à notre disposition pour évaluer le débit effectif du Rhône de Genève, la quantité d'eau qui s'écoule hors du lac.

Un premier calcul consistera à prendre les hauteurs moyennes du lac pour la période la plus rapprochée des époques de jaugeages, et, en leur rapportant les débits du Rhône, à en tirer la valeur annuelle moyenne de l'écoulement du lac. Pour les hauteurs moyennes du lac nous devons nous adresser à une longue série, car les variations annuelles et cycliques sont fort grandes comme nous le verrons plus tard. D'une autre part, nous ne pouvons nous écarter trop de l'époque des jaugeages, car ainsi que nous l'avons vu, les variations dans les conditions de l'écoulement du fleuve sont considérables, et celles-ci ont changé souvent fort rapidement. Je prendrai un moyen terme entre ces deux exigences, en choisissant pour les hauteurs du lac les moyennes mensuelles des années 1861 à 1880, et en les rapportant aux valeurs du débit du Rhône déduites des jaugeages de 1873 et 1874. Le tableau suivant donnera les chiffres obtenus par ces calculs:

Mois.	*Hauteur du lac.*	*Débit moyen.*	*Débits mensuels m^3.*
Janvier	1.202^m	133$^{m^3\ sec}$	356 167 200$^{m^3}$
Février	1.169	126	307 584 000
Mars	1.191	130	348 192 000
Avril	1.268	140	362 880 000
Mai	1.479	312	835 660 800
Juin	1.891	355	920 160 000
Juillet	2.242	448	1 119 923 200
Août	2.326	467	1 250 812 800
Septembre	2.051	405	1 049 760 000
Octobre	1.590	326	873 158 400
Novembre	1.381	155	401 760 000
Décembre	1.300	144	385 689 600
		Somme totale	8 291 808 000

8300 millions de mètres cubes, telle serait la quantité d'eau qui s'écoulerait année moyenne du Léman. Mais ce calcul est très incertain. L'incertitude vient :

D'une part des variations possibles dans les conditions d'écoulement du fleuve aux diverses époques de cette période de vingt ans.

D'une autre part des irrégularités d'une année à l'autre dans l'époque des manœuvres du barrage de Genève. J'ai attribué aux mois de novembre à avril le débit du Rhône, barrage fermé, mais il y a eu certainement dans cette saison nombre de jours et de semaines pendant lesquels, vu la hauteur accidentelle du lac, le barrage a été partiellement ou totalement ouvert ; au commencement et à la fin de la saison d'été, il y a eu parfois des fermetures partielles ou totales du barrage. Je ne puis dire si ces erreurs en sens opposés se compensent, et je dois à mon grand regret reconnaître l'incertitude grave qui compromet ce chiffre moyen de l'écoulement du Rhône à Genève.

Nous avons, pour quelques années seulement, la valeur exacte de la quantité d'eau écoulée par le Rhône de Genève, à savoir :

1° Pendant 14 mois, du 18 octobre 1873 au 31 décembre 1874, le Bureau vaudois des ponts et chaussées, pour donner une base précise aux projets qu'il étudiait de la régularisation du Léman, a fait faire des lectures journalières à différentes échelles fluviométriques, placées par ses soins dans le port de Genève et le Rhône. Nous utilisons dans ces séries les observations de l'échelle *Q* située à la Coulouvrenière, en aval du barrage, à côté du profil des jaugeages Pestalozzi et Legler ; à l'aide d'un tableau graphique où les valeurs des jaugeages sont ordonnées en fonction de la hauteur du fleuve, nous pouvons en déduire les débits de l'émissaire à une date donnée, et en moyennes mensuelles et annuelles.

2° Depuis l'établissement de la nouvelle machine hydraulique de la Coulouvrenière, la hauteur de l'eau du fleuve est observée chaque jour par les soins de M. l'ingénieur C. Butticaz, directeur du service des eaux de la ville de Genève. Depuis le milieu de l'année 1889, les travaux de dragage du lit du Rhône aval de la Machine ont été achevés, et depuis ce moment l'on a pu constater une relation régulière entre la hauteur de l'eau dans le fleuve et le débit de celui-ci. Pour déterminer cette relation, il est nécessaire de tenir compte de la pente superficielle variable du fleuve ; suivant la hauteur des eaux de l'Arve,

l'écoulement du Rhône est plus ou moins entravé, la pente superficielle variant de 20 à 50cm. Le débit de l'émissaire varie donc en fonction premièrement de la hauteur de ses eaux, secondement de la valeur de sa pente. M. le directeur du service des eaux de Genève a eu l'obligeance de me communiquer les valeurs journalières et mensuelles du débit du Rhône à partir du 1er mai 1889.

Je dispose des valeurs mensuelles du débit de l'émissaire du Léman pendant 14 mois des années 1873-74 et 36 mois des années 1889-92 ; au total 50 mois. Je puis donc en tirer une valeur provisoire du débit annuel du Rhône. Cette moyenne sera corrigée quand un nombre plus grand d'observations y auront été adjointes. Lorsque cette moyenne sera définitive, nous pourrons la considérer comme égale à la valeur moyenne du débit des affluents du lac ; pour le moment, vu la brièveté et la complication de la période que nous utilisons, l'effet de retenue positive ou négative du lac y est trop important pour que, sans autre, nous puissions attribuer ces chiffres du débit de l'émissaire au débit des affluents du lac.

Mais nous arriverons à déduire ce dernier, le débit des affluents, en ajoutant au débit du Rhône de Genève la valeur positive ou négative de l'eau accumulée dans le bassin du lac. Voici un exemple du calcul que j'ai fait pour le mois de janvier 1874.

Le lac était au limnimètre de Vevey :

le 1er janvier 1874 à la hauteur de 1.080m
le 1er février — — 0.948

il a donc baissé de 132mm, ce qui pour une superficie du lac de 582.4km2 représente un excès de débit de l'émissaire de 76 876 600m3. Le mois ayant 31 jours, cela fait par jour 2 479 000m3, et par seconde 29m3. Le débit du Rhône de Genève ayant été, pendant le mois en question, en moyenne de 110m3 sec, si j'en soustrais 29m3 sec, j'arrive à 81m3 sec pour le débit moyen des affluents(1) pendant ce mois de janvier 1874.

Je donne dans le tableau suivant les valeurs mensuelles du débit, en mètres cubes à la seconde, de l'émissaire *E* et des affluents *A* pour les 50 mois dont nous possédons les éléments. Pour les trois années 1874,

(1) Par affluents, il faut entendre le débit du Rhône du Valais, celui des affluents directs du lac, la pluie tombée sur le lac, et l'eau condensée à sa surface, moins la quantité d'eau enlevée par l'évaporation.

1890 et 1891, qui sont complètes, je puis donner en outre les moyennes annuelles. (1)

	1873		1874 (2)		1889		1890		1891		1892		Moyennes		
	E	*A*	*E*	*A*	*E*	*A*	*E*	*A*	*E*	*A*	*E*	*A*	*E*	*A*	Diff.
Janvier	—	—	110	81	—	—	113	144	96	41	218	144	134	102	— 32
Février	—	—	89	61	—	—	145	112	87	47	180	143	125	91	— 34
Mars	—	—	66	67	—	—	129	87	92	94	192	134	120	95	— 25
Avril	—	—	63	129	—	—	163	181	117	142	205	221	137	168	+ 31
Mai	—	—	117	170	—	—	236	292	309	361	156	284	204	277	+ 73
Juin	—	—	332	452	536	658	386	432	423	454	—	—	419	504	+ 85
Juillet	—	—	435	533	607	547	517	483	511	520	—	—	517	521	+ 5
Août	—	—	484	445	491	442	516	609	358	374	—	—	462	467	+ 5
Septembre	—	—	372	270	304	286	393	293	344	333	—	—	353	295	— 58
Octobre	—	—	274	173	238	303	198	190	203	219	—	—	228	221	— 7
Novembre	144	139	140	133	205	149	156	166	208	205	—	—	171	158	— 13
Décembre	123	86	147	146	148	127	129	92	163	179	—	—	142	126	— 16
Moyennes	—	—	218	222	—	—	255	255	243	248	—	—	252	252	+ 1

Alors même que je ne dispose que de peu d'années d'observations — quatre seulement —, vu le très grand intérêt de ces chiffres, j'en ai cherché les valeurs moyennes. Dans les dernières colonnes de mon tableau je donne les moyennes mensuelles des débits de l'émissaire et des affluents. Je le répète, ces chiffres ne sont que provisoires et seront corrigés dans la suite, et peut-être sensiblement modifiés.

Cependant nous pouvons espérer que les moyennes générales que j'ai obtenues et qui me donnent 252$^{m3\ sec}$ pour le débit moyen annuel des affluents du lac ne s'écartent pas beaucoup du chiffre définitif. En effet, si nous considérons les chutes de pluie des années en question, nous trouvons dans les observations de Genève pour la quantité annuelle :

(1) Pour les moyennes annuelles, j'ai tenu compte de la différence de longueur des mois.

(2) Dans le fascicule 1 des mémoires publiés par la section des travaux de la ville de Genève, sous le titre d'*Utilisation des forces motrices du Rhône*, M. Legler a donné un tableau complet des débits journaliers de l'émissaire et des affluents pour l'année 1874. J'en ai tiré des moyennes mensuelles qui ne s'écartent pas trop de celles que je publie dans ce tableau ; la moyenne annuelle de Legler, de 221$^{m3\ sec}$, aussi bien pour les affluents que pour l'émissaire, est, à 3 mètres près, le chiffre auquel je suis arrivé par mes propres calculs. Les différences entre les deux séries de valeurs proviennent des hauteurs limnimétriques utilisées. M. Legler se basant sur son échelle *B*, et moi sur le limnimètre de Vevey.

en 1874	654^{mm} d'eau météorique.
en 1890	914
en 1891	1006
moyenne des 3 années [1]	858^{mm} d'eau météorique

ce qui n'est pas trop éloigné de la normale de 1826 à 1890, laquelle est 834^{mm}. Nous avons donc eu la chance pour nos années de comparaison de rencontrer une année très sèche, 1874, une année assez humide, 1890, et une année très pluvieuse, 1891. Il est donc probable que les chiffres trouvés pour le débit des affluents ne sont pas très éloignés de ceux que nous donneraient une très longue suite d'années.

Utilisons donc la valeur de $252^{m3\ sec}$ que nous avons obtenue pour le débit moyen des affluents du lac. Cela nous donne pour le débit total annuel 7 964 000 000^{m3}.

Nous avons trouvé d'autre part, en rapportant les hauteurs moyennes du lac (1861-1880) au débit moyen de l'émissaire (voyez p. 442), que ce même débit annuel moyen des affluents devait s'élever à 8 291 808 000^{m3}.

Ces chiffres ne s'écartent pas trop l'un de l'autre, et j'estime qu'une valeur de 8 milliards de mètres cubes peut être acceptée provisoirement comme représentant le débit annuel probable de la totalité des affluents du lac.

Comparons ce chiffre à celui que nous donne la chute d'eau météorique. Nous avons évalué (p. 301) à 909^{mm} la hauteur moyenne annuelle de la chute d'eau sur l'ensemble du bassin d'alimentation du Léman, y compris le lac. Ce bassin mesurant 7994.5^{km2}, une telle chute représente un volume de 7267 millions de mètres cubes d'eau.

Nous trouvons donc une divergence étonnante dans les résultats de ces calculs. La quantité d'eau tombée sous forme de pluie et de neige sur le bassin d'alimentation est plus faible que la quantité d'eau qui s'écoule à Genève. Avant de discuter la signification de cette anomalie apparente, renouvelons les réserves que nous sommes obligés de faire sur l'exactitude de nos chiffres. La valeur annuelle de la pluie est incertaine, essentiellement par le fait de l'insuffisance des observations pluviométriques dans le vaste territoire du Valais. La valeur annuelle de l'écoulement du Rhône de Genève est incertaine par le fait du trop petit nombre d'années d'observations à notre disposition. Sans parler

[1] Les 11 autres mois qui ne rentrent pas dans le cadre des trois autres années nous donnent il est vrai un excédent de 216^{mm} sur la normale, qui relève assez sensiblement ce chiffre, et l'amène à 890^{mm} d'eau de pluie par an.

des mille causes d'erreurs d'observations nombreuses et diverses, faites par des agents différents et souvent par des méthodes différentes, nous avons donc dans nos chiffres fondamentaux une incertitude que nous devons reconnaître en la déplorant.

Cependant, tout en attendant avec impatience les corrections que de nouvelles expériences nous apporteront, je ne prévois pas qu'elles changent le sens de la divergence actuellement indiquée. Il y a longtemps que je suis en présence de ces chiffres ; il y a plus de 20 ans que j'ai, dans un premier essai, (1) tout à fait primitif, tenté de faire une telle comparaison. Ce travail de jeunesse, qui fourmillait de causes d'erreur, je l'ai déjà reconnu depuis longtemps, (2) m'amenait à un résultat du même genre que celui qui nous étonne aujourd'hui, excès de l'eau écoulée à Genève sur la chute de pluie dans le bassin d'alimentation. Depuis lors ce problème n'a cessé de me préoccuper ; je l'ai repris vingt fois en utilisant toutes les données nouvelles qui venaient en ma possession ; toujours le résultat était dans le même sens. J'ai fini par me convaincre (peut-être serai-je corrigé par l'avenir) qu'il y a là un fait naturel : le débit de l'émissaire du Léman est supérieur à la quantité d'eau qui tombe sur son bassin d'alimentation sous forme de pluie ou de neige. Si ce fait était réel, il faudrait l'expliquer.

Une première explication pourrait se chercher dans la déviation dans le bassin du Rhône de tout ou partie des eaux provenant d'autres bassins, ses voisins. Sur les frontières méridionales et dans toute la partie alpine (3) du bassin, il n'y a rien qui fasse soupçonner une pareille éventualité. Mais dans la région nord et nord-occidentale du lac, les

(1) *F.-A. Forel*. Comparaison du débit du Rhône à Genève sur la hauteur d'eau météorique. Bull. S. V. S. N., X, 445. Lausanne 1871.

(2) Voir la note de la page 644 Bull. S. V. S. N., X. Lausanne 1871.

(3) Au moment de terminer l'impression de ces pages, j'arrive même à soupçonner que le chiffre de 7995 $^{km^2}$ du bassin d'alimentation du Léman devrait être assez sensiblement diminué. Il a été mesuré sur l'atlas Dufour qui attribuait au bassin du Rhône le glacier de la Plaine-morte, au sud du Wildstrubel ; ce glacier, de 11 $^{km^2}$, appartient certainement, d'après la feuille 473 de l'atlas Siegfried, au bassin de la Simme, dans lequel il se déverse par le glacier de Rätzli. D'une autre part le Daubensee et son bassin d'alimentation, y compris le grand glacier de Lämmern, représentant ensemble 30 $^{km^2}$, a été attribué au Valais ; or d'après l'opinion de M. A. de Torrenté, de Sion, il doit verser ses eaux par des émissaires souterrains dans la vallée de la Kander. M. l'ingénieur R. Lauterburg, de Berne, se basant sur un rapport de M. G. Ischer, à Mett, l'auteur de la partie bernoise et de la feuille XVII de la carte géologique suisse, estime également que le Daubensee se déverse dans le Kanderthal. Daprès cela il y aurait certainement une dizaine et probablement une quarantaine de kilomètres à enlever au bassin du Rhône, et, de ce fait, le désaccord signalé serait encore plus marqué.

conditions géographiques semblent la rendre admissible. La vallée de Joux, à une altitude de 1000^{m} et plus, par conséquent de 600^{m} supérieure à la nappe du Léman, n'a pas d'écoulement apparent de ses eaux ; la majeure partie des eaux du lac de Joux arrive par des émissaires souterrains, cela semble bien prouvé, à la source de l'Orbe à Vallorbes. Mais il serait possible qu'une partie de ses eaux vînt se déverser par des canaux souterrains traversant la première chaîne du Jura, dans les sources de la Venoge, de l'Aubonne, de la Promenthouse et de la Versoie, affluents du Léman. Cela n'est pas probable ; les sources semblent représenter le drainage naturel du fleuve oriental de la montagne ; aucune d'elles n'a, ni par le volume de ses eaux, ni par leur température, le caractère d'un émissaire important du lac de Joux ; puis la chaîne du Jura forme une voûte, une anticlinale, difficilement perméable à des eaux souterraines. Cependant la question ne doit pas être écartée *a priori* ; si je suis bien informé, elle doit être mise prochainement à l'étude, à propos d'une demande de concession des eaux d'écoulement du lac de Joux. D'une autre part, le lac de Neuchâtel est à l'altitude de 435^{m} ; par conséquent, tout le plateau qui s'y déverse pourrait, par des canaux souterrains, évacuer ses eaux dans le Léman, de 60^{m} inférieur en altitude aux lacs du pied du Jura ; mais nous ne connaissons aucune source importante que nous devions attribuer à cette origine. — Ces eaux venant de bassins voisins entreraient-elles dans le Léman sous forme de sources sortant dans le fond du lac ? Les pêcheurs parlent souvent de sources sous-lacustres ; mais aucune d'elles n'est, à ma connaissance, démontrée. Le seul point où l'on pourrait en soupçonner avec quelque probabilité, la moraine sous-lacustre d'Yvoire, ne nous a pas fourni d'indices plausibles (v. p. 143).

Cet ordre d'explication écarté, il ne nous reste, pour rendre compte de l'anomalie signalée, qu'à invoquer une prédominance, sur les faits d'évaporation, de ceux de condensation à la surface des corps froids. Nous avons déjà indiqué le principe de cette action p. 361 ; mais son grand intérêt nous entraîne à y revenir un peu plus explicitement.

Les eaux qui s'écoulent par un fleuve sont la somme algébrique de trois facteurs : l'eau météorique tombée sous forme de pluie ou de neige à la surface du bassin d'alimentation — l'eau condensée directement sur les corps froids, rosée, givre — la quantité enlevée par l'évaporation ; cette dernière représente une quantité négative.

L'évaporation enlève dans l'air une quantité considérable d'eau.

Dix années d'observations siccimétriques, faites à Lausanne, par M. L. Dufour, ont donné une épaisseur moyenne de 738^{mm} (1) pour la couche d'eau évaporée annuellement, sur un bassin de deux mètres carrés; c'est une quantité qui approche de celle de la chute d'eau météorique moyenne de Lausanne, 976^{mm} ; un tel bassin n'écoulerait pour ainsi dire pas d'eau par son émissaire. Mais ces observations, les meilleures que nous possédions dans notre région, excellentes dans les conditions où elles ont été faites, ne sont certainement pas applicables à l'ensemble du bassin du Rhône. La quantité d'eau évaporée sur une surface compliquée comme le pays drainé par le fleuve, formée en grande majorité de rochers, de sable, de terrains en friche ou en culture, doit être relativement beaucoup moins considérable que celle qui se dégage d'un bassin d'eau, peu profond, se réchauffant puissamment au soleil d'été, caressé par l'air desséché de la terre ferme environnante. C'est probablement plusieurs centimètres, peut-être un ou deux décimètres d'épaisseur d'eau, qui sont enlevés annuellement à la surface du bassin d'alimentation du Léman; c'est certainement beaucoup moins que les 7 décimètres observés par Dufour dans sa station de Lausanne. Mais si la quantité d'eau tombée, en pluie et en neige, sur le bassin du Léman, était insuffisante pour nourrir à elle seule le Rhône de Genève, cette quantité étant notablement diminuée par l'évaporation, il nous faudra trouver une source d'apport d'eau qui compense et au-delà ce déficit. C'est dans la condensation sur les corps froids que nous la cherchons.

La rosée, qui se précipite à l'état liquide sur les gazons et autres corps solides à rayonnement puissant, représente parfois une assez forte quantité d'eau ; mais elle ne doit pas entrer ici en ligne de compte ; elle n'arrive guère à l'émissaire, la plus grande partie de cette rosée étant évaporée à l'air dans la journée subséquente. Le givre, espèce de rosée gelée qui prend un développement parfois si considérable sur les forêts des montagnes, peut être plus efficace pour l'alimentation des sources ; il représente souvent la valeur d'une bonne chute de neige. (2) Quant à la rosée qui se précipite sur les corps humides, sur l'eau, sur la neige, sur la glace, elle s'additionne à leur masse

(1) Bull. S. V. S. N. XIII, 444 et 684, Lausanne, 1874.

(2) Le givre, qui forme souvent sur les glaciers et sur les neiges une couche de plusieurs millimètres et même de centimètres d'épaisseur de cristaux serrés, représente une valeur d'eau condensée qui n'est certainement pas négligeable.

aqueuse, et est une source importante de l'alimentation des fleuves. Les expériences que nous avons faites, M. Ch. Dufour et moi, en 1870 et 1871, soit à Morges, soit au glacier du Rhône ([1]) ont prouvé que, suivant les circonstances, la quantité d'eau condensée à la surface des corps glacés, peut s'élever à une épaisseur de 0.1 à 0.5^{mm} par heure. La condensation a lieu à la surface des lacs et cours d'eau, des neiges et glaciers, quand leur température est au-dessous du point de saturation de l'air ; cette éventualité n'est pas très fréquente pour le lac, comme nous le verrons plus tard : elle est au contraire presque constante, dans les jours chauds du moins, sur les neiges, glaces et torrents glaciaires. Les neiges de la plaine en hiver, les neiges et glaciers de haute montagne pendant toute l'année, les torrents glaciaires pendant la saison chaude, sont des condensateurs puissants, qui soutirent directement à l'air une quantité considérable d'eau, laquelle échappe aux mesures des pluviomètres. Or, les neiges d'hiver représentent pour le bassin du Léman 7500$^{km^2}$, les glaciers et neiges éternelles 1000$^{km^2}$, le lac Léman 580$^{km^2}$, les torrents et rivières 4 à 5$^{km^2}$. Ces vastes surfaces seraient-elles capables, par leur condensation directe, de compenser et au-delà le déficit d'eau causé par l'évaporation, et de satisfaire à l'excès d'eau que nous trouvons en évaluant le débit du Rhône de Genève ? Je me borne à poser cette question, attendant de l'avenir la confirmation ou la correction des données fondamentales du problème. Quand les chiffres seront définitifs, alors seulement ce sera le moment de donner des conclusions sur la théorie du phénomène.

Il est encore un fait que je veux signaler dans les valeurs annuelles de l'eau fournie par les affluents du lac : c'est la faible différence que présente le débit des affluents du lac, entre une année sèche et une année humide. 1874 était une année très sèche ; elle n'a donné que 654^{mm} d'eau à Genève ; 1891 était une année humide, la chute de pluie a été de 1006^{mm} ; le rapport entre les chutes d'eau est de 65 %. D'une autre part la somme totale des affluents du lac a donné pour 1874 un débit moyen de 222$^{m^3\,sec}$, pour 1891, 248$^{m^3\,sec}$; rapport entre ces deux chiffres 89 %. Il semble donc que l'amplitude des variations des pluies s'atténuerait notablement dans les quantités d'eau écoulées par les rivières. Mais avant de discuter sur le rôle modérateur que représente-

([1]) Loc. cit. (p. 361).

rait ainsi le territoire du bassin d'alimentation, il est prudent d'attendre la confirmation de ces indications, par un nombre plus grand d'années de comparaison.

Le Léman a un volume de 89 milliards de mètres cubes; il s'écoule année moyenne environ 8 milliards ^{m3} par le Rhône de Genève. Le séjour moyen de l'eau dans le lac est donc de 11 années environ. C'est là une durée certainement assez prolongée pour que les eaux, différentes aux diverses saisons, des divers affluents du lac aient le temps de se mélanger et se pénétrer réciproquement, pour que l'eau perde ses caractères d'eau fluviatile et acquière les propriétés d'eau lacustre.

V. **Limnimétrie.**

On appelle limnimétrie l'étude de la hauteur des eaux d'un lac. On appelle limnimètre(1) tout appareil qui sert à mesurer la hauteur de la nappe de l'eau.

LIMNIMÈTRES

Un limnimètre doit être repéré, c'est-à-dire que le zéro de son échelle doit être rapporté à un point fixe dont l'altitude absolue ou relative est déterminée ou pourra l'être quand le besoin s'en fera sentir. Cette condition n'a malheureusement pas toujours été remplie, sur notre lac du moins, et la plupart des observations faites aux an-

(1) Le mot limnimètre est incorrect au point de vue de sa formation; les philologues nous disent qu'il devrait être changé en limnomètre; mais il ne peut plus être modifié, car il est entré dans l'usage général. Je le trouve employé sans interruption depuis l'époque où Nicod-Delom construisit son lymnimètre à flotteur à Vevey en 1817, par D.-A. Chavannes, 1824, Macaire-Prinsep, 1829, G.-H. Dufour, 1837, F. Burnier, E. Plantamour, etc. Il a cependant, dans la pratique, un inconvénient; il ne peut logiquement s'appliquer à la mesure de la hauteur des eaux dans un fleuve, et pour celui-ci, on devrait forger un potamomètre(!!); l'usage a fait adopter le terme hybride fluviomètre. Or à la sortie d'un lac, à Genève par exemple, on est forcé de dénommer deux échelles voisines, absolument semblables, l'une située dans le lac limnimètre, l'autre dans le Rhône fluviomètre, ce qui est absurde. Le mot *Pegel* des Allemands est certainement plus commode.

ciens limnimètres du Léman ne peuvent être rapportées à des hauteurs absolues que par des comparaisons directes ou indirectes souvent compliquées et, trop souvent aussi, incertaines.

Les limnimètres employés sur le Léman appartiennent à quatre types :

1° L'*échelle graduée*, règle en bois, en métal ou en marbre, graduée autrefois en pouces[1] actuellement en centimètres ou en demi-décimètres, fixée verticalement ou obliquement à un mur ou à un pilotis ; la règle plonge dans l'eau, et la hauteur de l'eau est lue directement sur l'échelle.

2° Le *limnimètre à flotteur*, situé dans un puits correspondant avec le lac par un tube d'alimentation. Le flotteur consiste en une bouteille, ou une sphère creuse en métal, ou mieux en un bassin de zinc, assez large, flottant sur l'eau comme un bateau. Ce flotteur porte une tige, guidée par des galets ou par un tube jusqu'à une fenêtre où se fait la lecture ; dans certains appareils, l'échelle est gravée sur les côtés de la fenêtre ; dans d'autres, elle est sur la tige du flotteur. Un index fixe signale le numéro de l'échelle auquel correspond la hauteur actuelle de l'eau.

3° Le limnimètre enregistreur ou *limnographe*. C'est un limnimètre à flotteur, à la tige duquel, par un artifice convenable, on a attaché un appareil enregistreur. C'est une variante du marégraphe de la mer.

4° Les *limnographes portatifs*, appareils enregistreurs mobiles, de petites dimensions, qui peuvent se déplacer ou se transporter.

Les limnographes fixes ou portatifs ayant été construits spécialement pour l'étude des seiches, j'en renvoie la description à un chapitre ultérieur. Je me permettrai de donner ici quelques conseils pratiques sur l'établissement des limnimètres.

I. Pour les échelles graduées. Les hydrographes allemands ont pris l'habitude d'en placer le zéro en haut, et ils ont ainsi une graduation montant de haut en bas. Cet usage qui peut se justifier (et encore ?) quand il s'agit des échelles fluviométriques établies sur des rivières, est à rejeter pour les échelles limnimétriques. Que l'on établisse

(1) Les mesures employées pour les anciens limnimètres du Léman étaient:

le pouce de Berne	= 0,0244^m,	le pied = 12 pouces.
le pouce vaudois	= 0,03^m,	le pied = 10 pouces.
le pouce du pied de roi	= 0,02707^m,	le pied = 12 pouces.

le zéro assez bas pour n'avoir jamais de cote négative, mais qu'on le place au bas de l'échelle, de telle sorte que les cotes plus élevées indiquent une crue de l'eau, les cotes plus basses une décrue ; la logique des faits l'exige impérieusement. Nous devons déplorer l'introduction pour notre lac de l'usage allemand, importé par les ingénieurs du nord de la Suisse, à l'occasion du procès du Léman, de compter les hauteurs de l'eau en cotes négatives sous le repère de la Pierre du Niton ; espérons que cet usage irrationnel disparaîtra prochainement et définitivement. (1)

II. Pour les limnimètres à flotteur. Je recommanderai de donner au flotteur des dimensions suffisantes pour que la pression de l'eau domine amplement tous les frottements de l'appareil. 20^{cm} de diamètre me semble une dimension convenable. Pour le flotteur, une bouteille de verre me paraît parfaitement en place. Si l'on préfère un flotteur en métal, qu'on le perce d'un trou à la partie supérieure, hors de l'eau, afin que les variations de pression dues aux différences de température puissent s'équilibrer à l'intérieur, qu'il n'y ait pas d'alternatives de compression et de dilatation, et qu'il n'y ait pas entrée de l'eau par des fissures presque inévitables du métal. Dans plusieurs des limnimètres du Léman pour lesquels on n'avait pas tenu compte de ce fait, on a vu le flotteur se remplir progressivement d'eau, et des erreurs systématiques ont apparu dans leurs indications.

III. Pour les limnographes. Tout appareil analogue au marégraphe, c'est-à-dire donnant par un procédé convenable l'enregistrement des dénivellations subies par un flotteur, satisfait à l'étude limnimétrique. Nous donnerons au chapitre des seiches les détails nécessaires pour les instruments établis sur le Léman, en vue spécialement de l'étude des dénivellations rapides de l'eau. Pour la simple étude limnimétrique, je me bornerai à deux recommandations.

a Que le flotteur du limnographe soit assez large pour dominer tous les frottements de l'appareil enregistreur.

b Que l'enregistrement soit continu et non intermittent ; car les seiches peuvent dans certaines circonstances altérer tellement le trait, que celui-ci ne soit plus reconnaissable dans les points espacés

(1) Dans sa séance du 9 mars 1867, la Commission hydrométrique suisse a décidé en principe que toutes les mesures de hauteur des eaux suisses, lacs et rivières, seraient rapportés à un horizon inférieur, c'est-à-dire que le zéro doit être au bas de l'échelle. (*R. Lauterburg.* Hydrom. Beobacht. der Schweiz. Bericht, Nachtrag p. 52. Bern 1867.)

d'heure en heure, et même de quart d'heure en quart d'heure de certains appareils.

Enfin, dernier conseil sur le repérage des limnimètres, qui s'adresse à celui du limnimètre à flotteur, comme à celui du limnographe. Tandis que pour la détermination de l'altitude absolue d'une échelle graduée on procède par un nivellement direct, pour le repérage d'un appareil à flotteur on est obligé d'agir par voie indirecte ; on mesure par un nivellement la hauteur de l'eau du lac au moment même où l'on fait une lecture au limnimètre. Nous ne pouvons assez recommander de ne pas se contenter d'une seule lecture ; les dénivellations de l'eau sont si nombreuses et si considérables parfois (voir le chapitre des seiches), qu'il est absolument nécessaire de poursuivre l'étude comparative pendant un temps assez long, quelquefois une demi-heure, une heure et plus, pour que l'on évite toute erreur provenant de ces dénivellations. Nombre d'incorrections dans le repérage des limnimètres viennent de l'oubli de cette précaution nécessaire.

Il est un fait dont il importe de tenir compte, quand il s'agit du repérage de tout limnimètre, c'est l'affaissement que le sol et les murs subissent parfois dans les années suivant immédiatement la construction. Un appareil, bien repéré le jour de son établissement, éprouve souvent une dénivellation qui se continue avec une intensité décroissante pendant assez longtemps. C'est ainsi que le limnimètre Nicod-Delom à Vevey a montré un changement d'équation de 4 pouces de Berne (98mm) entre les années 1816 et 1818. C'est ainsi que le limnimètre du Jardin anglais à Genève a montré un affaissement de (1)

32mm	de juin à décembre		1864
16	dans l'année		1865
7	»	»	1866
3	»	»	1867
1	»	»	1868
1	»	»	1869.

C'est ainsi que le limnimètre du quai Lochmann à Morges, établi en janvier 1888, avait le 30 mai 1891 un affaissement de 77mm d'après les nivellements de M. J. Epper.

Le zéro limnimétrique du Léman. ZL. — En 1854, le colonel Fr.

(1) *E. Plantamour.* Hauteur des eaux du lac, p. 11 Genève 1874.

Burnier, de Morges, a proposé de prendre pour le zéro des limnimètres du Léman un plan passant à 3.0^{m} en contrebas du repère de la Pierre du Niton de Genève. Cette mesure admise par E. Plantamour dans ses études sur les limnimètres du lac, par M. Ph. Plantamour, par le service des Eaux de Genève, par moi-même et par d'autres, doit être adoptée sans hésitation. Toutes les hauteurs des eaux du lac que j'ai déjà indiquées, et que je donnerai dans cet ouvrage, sont rapportées à cet horizon.

Cet horizon est désigné par les lettres Z L lorsqu'on est appelé à préciser pour éviter une confusion :

$$ZL = RPN - 3.0^{m}$$

Exemple : $ZL + 1.60^{m} = RPN - 1.40^{m}$.

L'histoire assez compliquée et très longue des limnimètres du Léman est résumée en particulier dans les mémoires suivants :

Macaire-Prinsep. Notice sur le niveau des eaux du lac de Genève. Mém. Soc. Phys. V 63. Genève (1829). 1832.

G.-H. Dufour. Notes sur les limnimètres établis à Genève (Dufour 1837). Bibl. univ. XIII 152. Genève 1838. Mém. Soc. Phys. VIII 119. Genève 1839.

G.-H. Dufour. Mémoire sur les hautes eaux du lac Léman (Dufour 1843). Bibl. univ. L, 322, Genève 1844. Mém. Soc. phys. X. 327. Genève 1843.

F. Burnier. Sur les limnimètres du lac Léman. Bull. S. V. S. N., IV 149. Lausanne (1854) 1856.

L. Gonin. Observations limnimétriques et pluviométriques dans le canton de Vaud. Bull. S. V. S. N., VII 367. Lausanne 1863.

E. Plantamour. Notice sur la hauteur des eaux du lac. 1838-73. Mém. Soc. phys. XXIII 427. Genève 1874.

Hirsch et Plantamour. Nivellement de précision de la Suisse. V^{e} livraison, p. 355, 1874.

F.-A. Forel. Contributions à l'étude de la limnimétrie du Léman. Bull. S. V. S. N. Lausanne 1877-81.

Ire série. XIV 589. IIe S. XV 129. IIIe S. XV 305. IVe S. XVI 641. Ve S. XVII 285.

E. Plantamour. Observations limnimétriques faites à Genève, 1806 à 1880. Mém. Soc. phys. XXVII 149. Genève 1881.

F.-A. Forel. Limnimétrie du Léman. Coordination de E. Planta-

mour et F.-A. Forel. Matériaux pour le Procès du Léman, p. 45. Lausanne 1881.

L. Gonin. Limnimétrie et altimétrie du lac Léman. Bull. soc. vaud. des ingénieurs et architectes. Lausanne 1891.

J. Epper. Notes et croquis sur les repères et limnimètres du lac Léman. Cahier héliographique. Berne 1892;

enfin dans les nombreux mémoires publiés à propos du Procès du Léman.

Je me bornerai ici à résumer l'histoire limnimétrique du Léman en donnant la liste des limnimètres du lac, avec l'équation de leur zéro rapportée au plan de comparaison ZL = RPN — 3.0^{m}. Pour transformer les lectures faites à ces limnimètres en cotes réelles de hauteur du lac, il faut leur additionner la cote du zéro de l'appareil si celle-ci est positive, il faut l'en retrancher si elle est négative. Ainsi par exemple le zéro du limnimètre de Villeneuve étant actuellement à ZL — 0.015^{m}, si je fais à cet instrument une lecture qui me donne 1.689^{m}, je corrigerai cette lecture en en soustrayant 0.015^{m} et j'obtiendrai pour la hauteur réelle du lac ZL + 1.674^{m}. J'appelle donc, avec d'autres auteurs, équation d'un limnimètre la différence positive ou négative entre son zéro et l'étiage du lac (ZL).

Villeneuve. Echelle graduée en fonte. Le bureau vaudois des Ponts et chaussées a adopté un type d'échelle en fonte de fer, divisée en mètres, décimètres et demi-décimètres, qu'il a fait établir dans toutes les stations du lac, en les scellant verticalement à un mur du quai ou à un pilotis; les observations y sont faites chaque jour à midi par un gendarme du poste voisin. Les cahiers d'observation sont conservés à l'état manuscrit dans les archives du Bureau. Je ne répéterai pas ces explications qui seront valables pour toutes les échelles caractérisées par les termes ci-dessus.

L'échelle de Villeneuve a été posée en juin 1889 et fixée à l'un des pilotis du débarcadère, à côté du poste de gendarmerie.

Equation.	1889 ZL	± 0.0^{m}	L. Gonin, limnimétrie.
	20 avril 1891	— 0.015^{m}	J. Epper. (1)

(1) Les corrections des limnimètres de Villeneuve, Ouchy et Morges que je donne ici diffèrent de quelques millimètres de celles que M. Epper a publiées dans ses Cotes et croquis. Cela tient à ce que cet ingénieur a adopté pour les repères

Chillon. Echelle graduée en fonte, établie en janvier 1874 dans le petit bassin, à l'angle sud du château.

Equation. 1874. ZL — 1.003m Deladoey 1874. Forel, limnimétrie.
1.004m L. Gonin.
21 avril 1891 — 0.9705m J. Epper.

Vevey. Echelle Mestrezat, plaque de marbre, graduée en pieds et pouces de Berne, scellée par les ordres du colonel Mestrezat, en 1779, dans le mur de sa propriété du Creux de Plan. Le port de cette propriété ayant été transformé en mars 1868, M. Ch. Nicod a donné l'ordre de replacer à nouveau l'échelle Mestrezat, en lui conservant exactement la même altitude; il a chargé de cette opération J. Gallandat, géomètre, à Lausanne, qui nous a affirmé avoir mis tous ses soins à ce travail, et n'avoir pas fait un écart de 1mm. Admettons que le niveau n'a pas été changé d'un centimètre. (1)

Equation. ZL + 0.241m L. Gonin, repérage en 1880 et 1881. (2)
Observations journalières, faites par Mestrezat, 1780 à 1825; les manuscrits sont égarés ou perdus. Maximums de hauteur du lac de 1780 à 1782, et de 1792 à 1825, dans G.-H. Dufour 1842. Minimum de 1779, donné par le zéro de l'appareil. Coordination de Forel, limnimétrie V. 310.

Limnimètre Nicod-Delom appareil à flotteur, gradué en pouces de Berne, avec le zéro en haut, les chiffres les plus élevés indiquant, par conséquent, une moins grande hauteur du lac. Construit, en 1816, sur l'Eperon de l'Aile; réparé en 1819. (3) Essai de coordination Forel, Limnimétrie V. 300.

NF 74, ⊙ 5 et NF 15 des cotes légèrement divergentes de celles du nivellement fédéral de précision.

		Nivellement fédéral.	Cotes et croquis Epper.
Villeneuve	NF 74	RPN + 0.734m	RPN + 0.7835m
Ouchy	⊙ 5	+ 3.452	+ 3.447
Morges	NF 15	+ 2.020	+ 2.0115

J'ai repris pour ces repères les cotes officielles données dans la Xe livraison du nivellement fédéral.

(1) Dans sa position primitive le pied de l'échelle de marbre était encastré dans le roc en place: dans sa position actuelle, le mur auquel l'échelle est fixée n'a pas montré de signes d'affaissement. (Vérifié en 1880 et 1882 par M. L. Gonin, en 1892 par M. Doret de la Harpe.)

(2) Voyez *Forel.* Limnimétrie V. 298.

(3) Description de D.-A. Chavannes. Feuille du canton de Vaud XI. 59. 1824.

Equation. ZL + 4.341 ± 0.057m.

Observations journalières de 1816 à 1840, irrégularités en 1818, lacunes en 1825 et 1826, erreurs en juin et juillet 1840. Cahier manuscrit à la Douane de Vevey, copie au Bureau vaudois des Ponts et Chaussées. Cotes du 1 et 15 de chaque mois de 1824 à 1831, dans les Feuilles du canton de Vaud de D.-A. Chavannes. Moyennes mensuelles, maximums et minimums de 1817 à mai 1840, Forel. Limnimétrie V, tableau XXI.

Limnimètre de l'Eperon de l'Aile. Appareil à flotteur établi par l'ingénieur W. Fraisse en 1846, graduation en pouces vaudois (30mm) jusqu'en janvier 1877, en centimètres depuis lors. Accidents ou réparations en janvier 1851, 3-18 septembre 1860, 24-27 août 1867, janvier 1877, 1888.

Equation. 1851-54	ZL + 0.163m	F. Burnier.
	+ 0.188	» correction de F.-A. Forel.(1)
2 juin 1870	+ 0.238	Benz. Nivellement fédéral V. 360.
Décembre 1870	+ 0.234	Deladoey »
14 novembre 1877	+ 0.192	L. Gonin. Forel. Limnimétrie III 306.
30 août 1886	+ 0.163	Epper.

Moyennes mensuelle, maximums et minimums de décembre 1854 à mars 1876, Forel. Limnimétrie V, tableau XXI.

Echelle graduée en fonte, établie en 1874 dans le port.

Equation.	30 août 1886	ZL — 0.814m	J. Epper.
	22 avril 1891	— 0.811	»

Echelle du Creux-de-Plan, en bois, graduée en centimètres, établie en 1881. Observations journalières 1881 à 1882.

Equation. ZL + 0.854m L. Gonin, 1881

Ouchy. Echelle en bois, graduée en pouces de Berne, établie en 1805, par Carré (?).

Equation. Octobre 1822 ZL + 0.37m Nicod-Delom. (2)

(1) J'ajoute aux corrections de F. Burnier la valeur de 25mm, dont j'ai constaté la nécessité par les vérifications que j'y ai apportées plus tard.

(2) D'après une note de Nicod-Delom ; à cette date le limnimètre de Vevey marquait 123 pouces de Berne et l'échelle d'Ouchy 40 pouces. Note manuscrite. Dossier Nicod-Delom appartenant à M. Morel, avocat, à Lausanne.

Limnimètre à flotteur établi en 1818 par Nicod-Delom sur le type de son appareil de Vevey, avec le zéro supérieur.

Equation. Octobre 1822 ZL + 4.31m Nicod-Delom. (1)

Limnimètre à flotteur, le modèle Fraisse, établi en 1843, dans le port, gradué en pouces vaudois. Détruit en 1861.

Equation. 1851-1854.	ZL — 0.307m	F. Burnier.	
	— 0.282	»	Correction F.-A. Forel.
	— 0.239	à — 0.296	Coordination Forel Limnimétrie V. 306.

Observations journalières 1843 à 1859. Cahiers manuscrits du Bureau vaudois des Ponts et Chaussées. Moyennes mensuelles, maximums et minimums de novembre 1843 à janvier 1850, Forel, Limnimétrie V, tableau XXI.

Echelle de bois fixée au mur du port, d'avril 1859 à 1868. Observations irrégulières. Manuscrits des Ponts et Chaussées vaudois.

Echelle graduée en fonte, fixée en 1868 au mur du port.

Equation.	mai 1870	ZL — 1.632m	Benz, nivell. fédéral.
	Novbre 1873	— 1.632	Redard.
	30 août 1886	— 1.632	Epper.
	30 mai 1891	— 1.631	Epper.

Morges. Echelle Burnier, en bois, graduée en pouces vaudois, établie en 1850, enfouie dans le nouveau quai en 1854. Repérage Burnier. Loc. cit. Coordination F.-A. Forel. Limnimétrie V. 304.

Equation.	ZL — 0.287m	F. Burnier.
	— 0.312	F.-A. Forel.

Observations journalières, février 1850 à novembre 1854. Archives des Ponts et Chaussées. Moyennes mensuelles, maximums et minimums. Forel, limnimétrie V, tableau XXI.

Echelle graduée en fonte, établie dans le port en 1874.

Equation.	1874.	ZL — 1.062m	Deladoey.
	1888.	— 1.062	J. Hörnlimann.
	30 mai 1891	— 1.0505	J. Epper.

(1) Je tire le zéro de l'observation faite à Ouchy de 121 1/2 pouces, tandis que le limnimètre de Vevey marquait 123 pouces.

Limnimètre enregistreur établi par F.-A. Forel, en mars 1876, dans le jardin de la maison nº 45, rue du Lac, détruit en 1883 par la construction du quai Lochmann. Description Forel, Limnimétrie I 598.

Equation. ZL $\pm$ 0.0ᵐ

Observations continues, interrompues en hiver quand les eaux baissaient au-dessous de 1.3ᵐ.

Limnimètre à flotteur, établi par M. E. de Vallière, ingénieur, en janvier 1888, au rond-point du Quai Lochmann. Gradué en centimètres.

Equation.	ZL	+ 1.10ᵐ	d'une part
	RPN	— 366.64ᵐ	d'autre part.

Ce limnimètre n'a pas tardé à montrer un affaissement progressif du zéro qui, en mai 1891, atteignait 77ᵐᵐ, M. J. Epper. L'index a été ramené, en mars 1892, à la position correspondante à l'équation de la double graduation.

Rolle. Limnimètre à flotteur, modèle Fraisse, gradué en pouces vaudois, établi en 1846, détruit en 1874.

Equation. 1851-1854	ZL — 0.483ᵐ	F. Burnier.	
	— 0.458	»	correction Forel.

Observations journalières 1846-1874. Archives des Ponts et Chaussées.

Echelle graduée en fonte, établie dans le port en avril 1874.

Equation.	décembre 1874	ZL — 0.897ᵐ	Deladoey.
	29 mai 1891	— 0.868	J. Epper.

Nyon. Limnimètre à flotteur, modèle Fraisse, gradué en pouces vaudois, établi en 1846, détruit en 1874.

Equation. 1851-1854	ZL — 0.081ᵐ	F. Burnier.	
	— 0.056	»	Correction Forel.

Echelle graduée en fonte, fixée au mur du port en mai 1874, déplacée le 3 avril 1879, lors de la construction du nouveau quai.

Equation.	Décembre 1874	ZL — 0.704ᵐ	Deladœy.
	1879	— 0.721	F.-A. Forel. (1)
	28 mai 1891	— 0.712	J. Epper.

(1) Par une coordination avec le limnimètre enregistreur de Morges.

Coppet. Limnimètre à flotteur, modèle Fraisse. Etabli en 1844, a duré jusqu'en 1868.

Equation. 1851-1854 ZL + 0.010 F. Burnier.
+ 0.035 » correction F.-A. F.

Echelle graduée en fonte établie en 1868.

Equation. Décembre 1874 ZL — 1.212^{m} Deladœy.
27 mai 1891 — 1.212 J. Epper.

Genthod. Echelle graduée en fer divisée en centimètres, fixée contre le mur du port, dans la propriété de M. Henri de Saussure, au Creux de Genthod.

Equation. 1874 ZL + 0.012 E. Pictet-Mallet. Niv. féd. V. 358.
27 mai 1891 — 0.0035 J. Epper.

Genève. Echelle de Maritz, en bois, avec équidistance des degrés de 3 pouces du pied de roi (81^{mm}), le nº 1 étant au haut de l'échelle. Etablie en 1739 en amont de la Machine hydraulique. Equation inconnue. Description dans H. de Saussure, la Question du Lac, p. 403. Observations hebdomadaires de 1739 à 1752, MS. Archives d'Etat de Genève nº 4666.

Echelle du Port-au-Bois, règle graduée en pouces du pied de roi, établie par la Société des arts de Genève en 1787. Observations journalières de 1787 à 1791, données par séries hebdomadaires dans le Journal de Genève de l'époque. Cotes et dates des maximum de ces cinq années (Dufour 1842). Quelques cotes isolées de 1790 à 1792. Dossier de Vaud dans le Procès de Genève, p. 44.

Equation. ZL + 0.076^{m} G.-H. Dufour 1837, p. 329.
+ 0.003 Forel (voir plus loin).

Limnimètre de la machine hydraulique, appareil gradué en pouces du pied de roi, établi par Paul en 1806 ; accident et réparation en avril 1842. Description de l'appareil, Dufour 1836, p. 154.

Equation. ZL — 0.600^{m} Filhon. Dufour 1837, p. 122.

Observations journalières de 1806 à 1843. Manuscrit des archives de la Machine hydraulique ; maximums et minimums de 1806 à 1837. Dufour 1837, p. 159.

Coordination avec le limnimètre du Grand-quai. Maximums de 1806 à 1843, Dufour 1843, p. 325. Même coordination, moyennes mensuelles

des mois d'été et maximums de 1806 à 1837, Plantamour 1881, p. 37 et 41.

IIe Limnimètre de la machine hydraulique placé dans la nouvelle machine après 1843.

Equation. 1874 ZL + 0.129m Nivellement fédéral V 357

Observations journalières du 10 octobre 1845 au 17 janvier 1879. Archives de la Machine hydraulique.

Echelle de la Pierre du Niton, pierre occidentale, petite pierre. Barre de fer oblique, établie par G.-H. Dufour en 1820, chaque division correspondant à un pied de roi dans la verticale. Dufour 1837, 153.

Equation. ZL + 0.225m · G.-H. Dufour.

Limnimètre du Grand-quai, appareil à flotteur, gradué en pouces de pied de roi, établi par G.-H. Dufour en 1837, détruit en 1862. Description Dufour 1837, p. 157.

Equation. ZL + 0.225m G.-H. Dufour.

Echelle de l'Ile Rousseau, en bois, graduée en pouces du pied de roi, établie en 1862. Description E. Plantamour 1874, p. 7. Coordination avec le limnimètre du Grand-quai. Plantamour 1874 p. 8 et 13, 1881 p. 17.

Equation. ZL + 0.225m E. Plantamour.

Limnimètre du Jardin anglais, à flotteur, gradué en centimètres, établi en 1864. Description et repérages, E. Plantamour 1874, p. 9.

Equation.	1864	ZL + 0.215m	Blanchot.
	1866	+ 0.162	Benz et Schönholzer.
	1874	+ 0.155	Redard.
	1886	+ 0.155	J. Epper. (1)

Les observations journalières faites aux trois derniers appareils, de 1838 à 1862 au limnimètre du Grand-quai, de juin 1862 à décembre 1866, à l'échelle de l'Ile Rousseau, et de janvier 1867 à aujourd'hui au limnimètre du Jardin anglais, sont publiées dans les cahiers mensuels des Archives de Genève. Les moyennes mensuelles, les maximums et minimums annuels ont été coordonnés par E. Plantamour 1874 p. 20, et 1881 p. 21.

Echelle de Sécheron en cuivre, divisée en centimètres, établie

(1) Cotes et croquis des Repères fédéraux à Genève. Nivellement année 1886. Recueil héliographique.

en 1874 par M. Ph. Plantamour dans le port de sa villa de Sécheron, à l'extrémité nord du quai des Pâquis, rive droite du lac.

Equation. 1874 ZL ± 0.000^m^ Niv. féd. V 358.
26 mai 1891 — 0.0003 J. Epper.

Observations journalières du 14 mars 1874 au 10 octobre 1877. Arch. VII 465. Genève 1882.

Limnographe de Sécheron établi par M. Philippe Plantamour à l'angle nord de sa villa, dans l'été de 1877. Description Arch. LXIV 318. Genève 1878.

Equation. ZL ± 0.000^m^

Hauteurs journalières du lac publiées depuis 1877 dans les Archives de Genève, tome VII 468, 1882 ; XIX 267, 1888 ; XXI 116, 1889, etc.

Plusieurs échelles temporaires ont été établies dans le port et dans le Rhône ; leur description est donnée par E. Plantamour 1874 p. 7. Les observations journalières ou hebdomadaires sont manuscrites ; je citerai :

Echelle de la Jetée, jetée des Eaux-Vives, en bois, automne 1858.

Echelle du bateau des lavandières, en bois, fixée à un pilotis amont du barrage, 1858.

Echelle du quai de la Petite-Fusterie, en fonte, type vaudois, 1880.

MM. Pestalozzi et Legler ont fait poser, en 1873, 13 échelles de bois, graduation métrique, avec le zéro en haut, sur divers points du port et du Rhône. J'indique leur position et la cote de leur zéro.

A	à l'entrée du port, jetée des Eaux-Vives **Equation.** ZL	+ 2.780^m^
B	débarcadère des bateaux à vapeur en amont du Pont du Mont-Blanc, rive gauche	+ 2.970
C	débarcadère des bateaux à vapeur, rive droite en amont du pont du Mont-Blanc	+ 2.940
D	rive gauche, devant l'Ecu de Genève	+ 2.900
E	bras gauche du fleuve, près des bains, sous le barrage	+ 2.970
H	bras droit, au-dessus de la machine hydraulique	+ 3.080
I	bras droit, quai du Seujet, en amont du moulin David	+ 2.200

K	au milieu du pont de la Coulouvrenière	**Equation.** ZL	+ 2.090
N	rive gauche, bains de la Coulouvrenière		+ 2.430
P	rive droite, St-Jean		+ 1.750
Q	rive gauche en amont du café de la Jonction à la Coulouvrenière, au mur du jardin Ducommun		+ 1.820
R_1	rive gauche, vers la roue d'irrigation supérieure		+ 1.670
R_2	rive gauche, vers la roue d'irrigation inférieure		+ 0.980

Description. Mém. Pestalozzi et Legler, p. 6. Observations journalières du 14 octobre 1873 au 31 déc. 1874. Cahier autographié du Bureau vaudois des Ponts et chaussées.

Echelle en bois fixée à la place du limnimètre Q de Pestalozzi et Legler. Observations journalières du 19 octobre 1880 au 21 février 1881, ms.

Echelle de fonte, type vaudois, à la même place, posée le 22 février 1881. Observations journalières trois fois le jour, ms.

Depuis la transformation des usines hydrauliques de Genève, les échelles fluviométriques situées dans le cours du Rhône sont, en 1892 : [1]

		Equation.
N° 3.	Ancienne machine hydraulique, amont de la pile.	ZL — 1.156^m
4.	Id. aval des rideaux	— 2.386
5.	Vannes Séchehaye, aval	— 1.450
6.	Quai Besançon Hughes, amont	+ 0.642
7.	Id. aval	+ 0.632
8.	Passerelle de l'Ile, bras gauche	— 1.938
9.	Bâtiment des turbines, amont	— 2.001
10.	Id. aval	— 3.610
11.	Jonction, ancienne échelle	— 3.440
12.	Id. nouvelle échelle	— 3.440

Thonon. Echelle gravée sur les blocs de marbre formant mur du quai, graduée en centimètres, établie vers 1865.

Equation. ZL + 0.863^m

(1) Notes de M. C. Butticaz, ingénieur des Eaux de Genève.

Cette cote est obtenue en prenant le chiffre inscrit au sommet de la règle, 373.84m, en le rapportant à la valeur de RPN dans le nivellement Bourdaloue, 374.052m, et en tenant compte de la longueur de la règle, 1.925m.

En 1875, par une comparaison d'une année entière d'observations limnimétriques, j'ai trouvé pour ce zéro ZL + 0.545m. En 1876, les ingénieurs de Thonon m'ont donné pour le zéro la cote 371.70m, système Bourdaloue, ce qui amènerait le zéro à ZL + 0.648m.

Le 22 août 1886, une lecture simultanée de huit limnimètres du lac a donné à M. Epper, pour le zéro de l'appareil, ZL + 0.755m.

Limnographe établi en 1880 par le Bureau des Ponts et chaussées de Thonon; l'appareil a été installé par la Société de construction d'instruments de physique de Plainpalais, Genève. Enregistrement continu ; Archives des ponts et chaussées.

VARIATIONS LIMNIMÉTRIQUES. VARIATIONS DE HAUTEUR

Les variations que l'on peut observer dans la hauteur de l'eau, soit qu'on l'étudie d'un jour à l'autre, soit que l'on compare au même instant deux stations différentes, se rapportent à divers phénomènes qu'il est nécessaire de bien distinguer; ces variations sont désignées par les auteurs sous les noms de changements de niveau, de variations de niveau, de dénivellations. J'ai essayé d'y mettre un peu d'ordre, et pour cela j'ai fait quelques définitions. (1) Les changements d'altitude absolue de la nappe de l'eau dans une station (autres que les vagues et vibrations du lac, que nous étudierons plus tard) peuvent être de deux natures très différentes :

a Les unes sont des modifications générales, dues aux changements de volume de la masse du lac; toute la nappe s'élève ou s'abaisse dans son ensemble, le niveau général restant horizontal. J'appelle ces modifications des *variations de hauteur*, variations en hausse ou en baisse, *crues* ou *décrues* du lac.

b Les autres sont des modifications locales, différentes dans les différentes localités du lac. La masse du lac, le volume de l'eau restent les mêmes; la hauteur moyenne du lac n'est pas modifiée, mais la nappe s'incline ou s'infléchit et la surface de l'eau n'est plus horizontale.

(1) Limnimétrie du Léman, I, 36.

L'eau s'élève en certaines régions du lac pendant qu'elle s'abaisse dans d'autres régions. J'appelle ces changements dans le niveau de l'eau des *dénivellations*.

Dans cette partie de notre livre, nous ne traiterons que des variations de hauteur de l'eau.

Le lac étant un bassin où l'eau des affluents entre, et d'où l'eau sort par l'émissaire, toute différence entre le débit des affluents et celui de l'émissaire se traduit par une variation de hauteur. Le débit des rivières s'exprimant en mètres cubes à la seconde, nous avons le rapport suivant :

S étant la superficie du lac en mètres carrés ;

h' la variation de hauteur du lac en mètres ;

t la durée de la variation en secondes ;

D la différence de débit entre les affluents et l'émissaire, exprimée en mètres cubes à la seconde ($^{m3\ sec}$).

$$D = \frac{h' \times S}{t}.$$

Pour le lac Léman dont la superficie est de 582.4^{km2}, toute variation de 1^{mm} représente une différence entre l'entrée et la sortie de $582\,400^{m3}$; toute variation de 1^{mm} en 24 heures représente une différence de débit de $6.74^{m3\ sec}$ entre les affluents et l'émissaire ; toute variation de 1^{mm} par heure, une différence de débit de $161.8^{m3\ sec}$. Si la variation de hauteur est en crue, c'est le débit des affluents qui l'emporte ; si elle est en décrue c'est le débit de l'émissaire qui est le plus fort.

Tout lac est soumis à des variations de hauteur de deux types différents :

Les unes sont périodiques, et sont régies par les variations périodiques du débit des affluents.

Les autres sont accidentelles ou irrégulières, et sont causées par les variations accidentelles, naturelles ou artificielles du débit des affluents et de l'émissaire

Nous avons donc à étudier sur notre lac le caractère de la courbe normale de variation périodique, l'amplitude de ces variations périodiques, et en second lieu, les variations accidentelles qui modifient cette courbe normale.

LIMNIMÉTRIE DU LÉMAN

Sur un lac sauvage, dont l'émissaire n'a point son débit réglé par des barrages, et dont la puissance d'écoulement est fonction directe de la hauteur des eaux, les variations de hauteur de la nappe suivent exactement les variations du débit des affluents. Ceux-ci étant soumis à des crues et décrues importantes dues aux différences des saisons, le lac subit de fortes crues et décrues annuelles, qui peuvent être incommodes pour les riverains; exagérées par des causes accidentelles, les trop hautes eaux inondent les bords du lac, les trop basses eaux gênent la navigation, ou sont insuffisantes pour la marche des moteurs hydrauliques placés sur le cours de l'émissaire. L'industrie de l'homme cherche à réduire autant que possible l'amplitude de ces variations périodiques et accidentelles, et à assurer à la hauteur du lac une stabilité toujours plus parfaite.

Tel est le cas du lac Léman qui, depuis l'année 1713, est transformé de plus en plus en un lac artificiel, dont la hauteur est réglée par les digues et barrages de Genève. La digue de la Machine des fontaines a eu d'abord pour fonction d'empêcher la chute excessive des basses eaux et de permettre la navigation à l'entrée du port de Genève, tout en assurant la sécurité de la ville contre un ennemi qui aurait pu profiter des eaux guéables pour l'envahir; en même temps ces digues, emmagasinant l'eau du lac, réservaient une chute suffisante pour les roues hydrauliques, nécessaires à l'alimentation d'eau de la ville. A partir de 1713 — et probablement même avant, car les nombreux moulins du Rhône établis de temps immémorial dans la traversée de Genève, avaient certainement des barrages de fonction analogue, — le lac Léman n'est plus un lac naturel, et ses variations sont en partie altérées, ou réglées, suivant le point de vue auquel on les considère, en tous cas diminuées d'amplitude par le jeu des digues de Genève.

Mais ces digues et barrages, bien primitifs et impuissants dans le siècle dernier, ont été perfectionnés et complétés à mesure que les besoins de la ville réclamaient un plus grand volume d'eau pour l'alimentation, et une plus grande profondeur d'eau pour la navigation. Les machines hydrauliques de Genève de 1820, 1840, 1856, 1863, 1871

ont de plus en plus et de mieux en mieux fermé le lac en hiver et relevé le niveau des basses eaux. En même temps, rétrécissant toujours plus le lit du fleuve, elles obstruaient le débit de l'émissaire pendant l'été, tellement, que dans les années humides, le lac refluait et inondait ses rives. Les réclamations suscitées par cet état imparfait des choses provoquèrent le Procès du Léman, dont nous parlerons plus loin, et amenèrent la convention du 17 décembre 1884 qui formule les bases de la régularisation du Léman. Aidée par une subvention importante de la Confédération suisse et des états de Vaud et du Valais, la ville de Genève a déplacé sa machine hydraulique, autrefois en tête de l'Ile, et l'a établie à la Coulouvrenière; elle a dragué, élargi et débarrassé le cours du fleuve; elle s'est assurée ainsi la disposition d'une force motrice superbe, évaluée à 6000 chevaux ou 450 000 kilogrammètres par seconde, tout en organisant une régularisation, très parfaite semble-t-il, du régime du lac; les basses eaux ont été relevées, et, aux hautes eaux, un débit assez libre a été réservé au fleuve pour qu'il n'y ait plus de crainte d'inondations sur les bords du lac; l'amplitude des variations de hauteur du lac a été considérablement réduite. Les constructions et dragages ont été exécutés dans les années 1884 à 1889, et le nouveau régime du lac date définitivement de l'automne 1889, époque à laquelle tout a été terminé. Dorénavant le lac Léman est un lac civilisé, dont les variations et les débordements sont réduits à des dimensions très innocentes.

Pour connaître le régime naturel du lac, nous devrions donc nous adresser aux siècles passés, avant la construction de toute digue à Genève; mais les observations nous manquent pour ces époques lointaines, et sauf quelques dates et faits isolés, nous en sommes réduits aux observations limnimétriques du siècle actuel. Plus les observations sont anciennes, mieux elles se rapportent à l'état de nature, plus par conséquent elles ont de l'intérêt pour nous, dans cette étude d'histoire naturelle. Ajoutons cependant que leur repérage est plus difficile et souvent incertain.

Nous avons dit que les machines de l'Ile de Genève, construites primitivement en 1713 ont été reconstruites ou agrandies vers 1820, 1840, 1863 et 1871, et transportée en 1885 à la Coulouvrenière, au-dessous de la ville. Chacune de ces dates sera donc une étape dans la transformation du lac sauvage en lac civilisé.

Première période, antérieure aux digues de Genève. Malheureusement nous ne possédons aucune observation positive antérieure à l'année 1713.

Nous savons seulement que les hautes eaux ne dépassaient pas ordinairement les cotes ZL + 2.4 à 2.5^{m}, car, sans cela, les villes riveraines construites dans le moyen âge auraient été inondées. C'est ce qui résulte d'une étude attentive faite en 1882, par les ordres du gouvernement vaudois, dans les villes et bourgs de Villeneuve, Montreux, Vevey, Lutry, Cully et Morges ; on a compté les locaux, en sous-sol, ou rez-de-chaussée, envahis par les inondations des années précédentes et l'on a, par un nivellement, mesuré la hauteur du sol de ces locaux. D'après les documents conservés aux archives des Ponts et Chaussées de Lausanne, le total s'élève à :

132	caves et sous-sols	à la cote ZL +	2.6^{m}
103	»	»	2.5
45	»	»	2.4
35	»	»	2.3
23	»	»	2.2
9	»	»	2.1
22	»	»	2.0 et au-dessous.

Si l'on critique en détail, comme j'ai pu le faire à Morges, les conditions de ces divers locaux, l'on constate que les caves à la cote de 2^{m}, et au-dessous, sont toutes modernes ; construites par des propriétaires imprudents, pendant une année à eaux estivales exceptionnellement basses, (1857 à 1858 entr'autres), elles étaient assez fréquemment inondées pour que l'on fût engagé à les combler ou à les relever. Les caves anciennes, celles qui ont résisté à l'expérience des siècles, ont leur sol au-dessus des cotes ZL + 2.4 ou 2.5^{m}. Ce sont ces cotes qui donnent la limite apprise par l'usage pour la construction des caves au bord du Léman. De l'existence d'un grand nombre de caves à ce niveau, on peut admettre, comme probable, que lors de la construction de ces rues et de ces villes, les hautes eaux dépassant 2.4 et 2.5^{m} étaient non seulement chose rare, mais tout à fait exceptionnelle. Pour qui connait en effet les ennuis, les inconvénients, les dangers de l'état d'inondation des caves et rez-de-chaussées, tel que nous l'avons expérimenté trop souvent dans les dix années de 1870-1880, il est évident que ce n'est pas volontairement qu'un propriétaire s'y est exposé, lors de la construction de sa maison. Or, comme une ville ou

une rue ne se bâtit pas en une année, mais successivement et progressivement, j'estime que l'on peut tirer de la position de ces caves une inférence assez probable que, dans les siècles passés, à l'époque de la construction des rues et villes basses des rives du Léman, les hautes eaux du lac atteignaient rarement la cote ZL + 2.5m.

C'est surtout très évident à Villeneuve où le nombre des locaux descendant à des cotes très basses, datant des siècles antérieurs, est considérable (78 locaux ont une cote inférieure à 2.5m). On retrouve, en outre, sous le pavé des caves inondées dans les années 1876 à 1879, d'anciens pavés qui indiquent une hauteur générale du sol habité bien inférieure à celle que nous avons vu être l'extrême limite dans les conditions du lac de la seconde moitié du XIXe siècle. Je citerai, comme exemples, les pavés retrouvés en 1882 quand on a creusé dans la cave de la maison P.-L. Masson à 2.4m, et dans le pressoir de la maison F.-E. Hoffmann à la cote 2.1m. (1)

Nous pourrions nous fonder aussi sur les résultats de l'enquête faite en 1822 par le préfet De Loys de Chandieu, à Lausanne, S. Nicod-Delom, à Vevey, et Chausson, à Noville. Cette commission a réuni tous les faits, souvenirs et dépositions apportés par les vieillards de toutes les localités riveraines; tous ont prétendu que le lac s'était considérablement élevé depuis le temps de leur première jeunesse; tous ont donné des témoignages aussi nets et aussi affirmatifs que ceux des vieillards qui ont paru à Genève dans la séance du 21 juillet 1882 devant la délégation du tribunal fédéral. Nous n'avons pas récusé les témoignages de ces derniers, (2) nous aurions le droit de nous fonder sur les témoignages des vieillards de 1822. Mais nous voulons baser l'étude actuelle uniquement sur des faits objectifs, vérifiables et contrôlables. Nous laisserons donc de côté cet ordre de preuve qui, du reste, nous le reconnaissons volontiers, est passible de critiques facilement justifiées.

Quant aux basses eaux de ces périodes anciennes, nous avons deux faits à citer :

Le premier est le récit, donné par Fatio de Duillier, des circonstances qui ont amené la construction de la digue du Rhône, en 1713. Nous l'avons déjà reproduit page 408.

Le second fait, c'est l'existence des carrières de molasse submergées.

(1) Notes de M. G. Delapraz, géomètre, à Villeneuve.

(2) Voir ci-dessus, p. 243.

Des bancs de molasse apparaissent en plusieurs points, sur la grève du lac ; là où cette pierre est de qualité suffisante, elle a été exploitée et des carrières ont été ouvertes jusqu'à l'extrême limite des basses eaux, ainsi que le décrivait le voyageur anglais Addison, en 1702 : « Il y a, près de Genève, plusieurs carrières de pierre de taille, qui s'étendent jusqu'au-dessous du lac. Lorsque les eaux sont fort basses, on fait au-dedans de ses bords un petit carré entouré de quatre murailles.(1) Dans ce carré, on creuse une fosse et l'on y fouille pour chercher la pierre, les murailles empêchant que les eaux n'y entrent, lorsque le lac enfle et inonde tous ses bords. La grande facilité qu'il y a de voiturer ces pierres, fait qu'on les a à meilleur marché qu'aucunes autres qui se trouvent ailleurs. On voit, en passant à la voile, plusieurs fosses profondes qui ont été faites en divers temps. (2) » Addison semble les avoir vues dans le petit voyage de cinq jours qu'il fit sur le lac, pendant son séjour à Genève, au printemps de 1702. Mais, a-t-il assisté à l'exploitation de ces carrières, qu'il décrit fort bien ? ou bien, frappé par l'apparition singulière de ces vastes et nombreuses chambres rectangulaires qui découpent, comme un damier, une vaste étendue de la beine, les a-t-il étudiées en passant et s'est-il fait expliquer leur formation ? Cela ne ressort pas immédiatement du texte cité. En tout cas, il en parle comme d'une affaire contemporaine, et non comme de faits appartenant à un passé légendaire. C'est donc, ou bien à l'hiver de 1702, ou bien à quelques années antérieures à cette date, que nous devons rapporter l'ouverture de ces carrières, aujourd'hui inondées par les eaux du lac.

On connait six localités où de semblables carrières sont encore visibles sous les eaux du lac (3) : à Pully, près Lausanne, à Fraidaigues,

(1) Les carrières sont encore aujourd'hui assez intactes pour que l'on distingue parfaitement, autour de quelques chambres d'exploitation, les trous où étaient enfoncées les palplanches, destinées à supporter les murailles de protection, décrites par Addison.

(2) *Addison*. Remarques sur divers endroits de l'Italie. Voyage de M. Misson. Utrecht 1722, p. 299.

(3) Il y avait autrefois des carrières analogues à Ouchy ; elles ont été signalées dans l'enquête de 1822 ; elles sont actuellement recouvertes par le grand quai devant la gare du chemin de fer funiculaire.

Pour qui voudrait visiter ces carrières submergées, voici quelques indications suffisantes permettant de les retrouver. Elles sont situées :

à Pully, à côté du débarcadère ;

à Fraidaigues, devant la villa ;

près St-Prex, à Founex, près de Céligny, (¹) à Coppet, au Reposoir, sous Pregny, près de Genève, et à Montalègre, sous Cologny, également près de Genève. Ces dernières ont été étudiées fort attentivement par Macaire-Prinsep, qui en a donné une bonne description, avec un plan détaillé au 2000e. (²) On peut aujourd'hui, en mesurant la profondeur de l'eau au point le plus avancé du bord de la chambre d'exploitation, en déduire la hauteur approximative de l'eau au moment où le creusement a été commencé. Voici les chiffres que nous obtenons ainsi :

Carrière de Pully	ZL + 0.37m	M. Fl. Robert	1880.
Carrière de Fraidaigue	ZL — 0.3m	F.-A. Forel	1880.
Carrière de Founex	ZL ± 0.0m	»	1892.
Carrière de Coppet	ZL — 0.23m	»	1892.
Carrière du Reposoir	ZL — 0.05m	Jean Lombard et F.-A. Forel	1892.
Carrière de Montalègre	ZL — 0.5m (³)	»	1892.

D'après cela, à une époque inconnue que nous pouvons rapprocher de l'an 1700, les basses eaux du lac descendaient aux cotes — 0.3m ou — 0.5m de notre échelle limnimétrique.

Quoiqu'il en soit, il est probable qu'à ces époques anciennes l'amplitude des variations annuelles devait être considérable ; aux basses eaux, le cours du Rhône était insuffisamment barré par des digues primitives, et le lac devait s'abaisser considérablement en hiver ; les hautes eaux devaient être surélevées par les obstacles nombreux qui

à Founex, devant la frontière du territoire entre le cercle de Coppet et l'enclave de Céligny ;
à Coppet, à environ ½ kilomètre au nord de la ville ;
au Reposoir, près Genève, devant la villa Rothschild ;
à Montalègre, sous Cologny, sur un kilomètre de longueur de la côte ; les plus belles sont au nord du port de la villa Brot.

(¹) Dans le journal de la commission d'enquête de 1822, tenu par Nicod-Delom (dossier appartenant à M. M. Morel), je trouve sur ces carrières de Founex une note qui pourrait conduire à des recherches fructueuses : « En 1813 (lisez 1713) il y a eu procès avec le baron de Coppet pour les droits d'exploitation d'une partie de ces carrières, qu'il s'attribuait ; on transigea. » Je n'ai pas su, jusqu'à présent, retrouver les actes de ce procès.

(²) *Macaire-Prinsep*. Notice sur les travaux entrepris sur le niveau du lac de Genève. Mém. soc. phys. Genève. V. 64. 1824.

(³) Les chambres des carrières de Montalègre ont en général leur bord à la cote ZL — 0.5m ; mais il y a, à l'extrémité nord du grand groupe des carrières situées à 200m au nord du port Brot, deux chambres dont le bord descend à ZL — 0.9m ; je les ai visitées et mesurées deux fois en mai 1892. Je préfère cependant m'en tenir à la cote ZL — 0.5m qui est déjà suffisamment étrange.

obstruaient l'émissaire, les quatre rangées des pilotis du port, les ponts, et enfin les nombreux moulins bâtis sur pieux, qui faisaient sur les deux bras du Rhône une véritable ville lacustre.

2e période, de 1713 à 1820. De la période 1713 à 1820, nous avons déjà quelques observations limnimétriques datant du milieu et de la fin du siècle dernier et du commencement du XIXe ; elles sont difficiles à coordonner avec les nivellements actuels. On peut cependant être certain de quelques faits que je citerai en détail, vu leur intérêt historique.

A. En 1739, ou peut-être déjà avant, l'ingénieur bernois Maritz, directeur de la machine hydraulique de Genève, avait établi une échelle limnimétrique, le premier limnimètre connu sur le Léman, consistant en un pieu sur lequel étaient fichées des chevilles espacées de 3 pouces, soit de 81mm ; leur numérotation allant de haut en bas, l'échelle était du type des limnimètres à zéro supérieur. Nous possédons encore des observations régulières faites, chaque samedi, du 7 février 1739 au 31 mars 1752, plus quelques notes isolées ; les manuscrits en sont conservés aux Archives d'Etat de Genève, dossier no 4666. Nous les utilisons dans notre tableau limnimétrique, mais en les accompagnant des remarques suivantes :

L'échelle n'était malheureusement pas repérée et nous ne savons, pas plus que M. H. de Saussure, (2) comment les rapporter à des hauteurs connues. Les cotes des maximums et minimums que nous en tirons n'ont donc pas de valeur absolue, mais seulement une valeur relative.

Nous déduirons de ces valeurs extrêmes l'amplitude de la variation annuelle. Mais ici encore nous devons faire une réserve. Nous ne savons pas la situation de l'échelle, mais elle était probablement près de la machine hydraulique, autrement dit dans le Rhône, en aval du port. Par conséquent la pente variable de la sortie du lac entache ces observations d'une erreur variable, si nous voulons en tirer la variation de hauteur du lac. Nous ne savons comment corriger cette erreur. Les valeurs de cette variation, telles qu'elles sont indiquées par notre tableau, sont probablement trop faibles.

Nous donnerons encore dans notre tableau les dates des maximums et minimums. Nous devons noter à leur sujet que ces dates ne sont

(2) *Question du lac*, p. 403.

qu'approximatives. En effet, d'une part les observations ne se faisaient qu'une fois par semaine ; d'une autre part les degrés de l'échelle étant fort espacés, les eaux restaient souvent longtemps au même numéro (au printemps de 1741 nous trouvons pendant 5 semaines la même cote). J'ai pris dans ces cas la date moyenne de la période pour laquelle la cote extrême est indiquée.

Nous trouvons encore dans les observations de Maritz des données sur l'époque des manœuvres du barrage, et c'est d'après ces notes que j'ai inscrit, à la note de la page 414, la date moyenne du 17 mars pour l'époque de l'ouverture du barrage, et celle du 19 novembre pour l'époque de la fermeture. La manœuvre se faisait en général quand l'eau arrivait en montant ou en descendant à la cheville n° 24 correspondant à la cote relative 0.811m : mais cette règle était loin d'être rigide ; le 8 avril 1750 on ouvrait le barrage alors que l'eau n'était qu'à la 29e cheville (0.487m), tandis que l'année précédente on l'avait déjà ouvert le 8 février parce que l'eau arrivait à la 22e cheville (cote relative 0.973m). Même variabilité pour les conditions de la fermeture. Ces manœuvres semblent du reste avoir été conduites avec intelligence, et en tenant compte juste de la hauteur du lac et de la saison.

B. La cote des hautes eaux de 1775 nous est donnée par une note du chevalier G. Shuckburgh (ou Shuckborough), naturaliste anglais (1) qui l'a prise pour base de mesures hypsométriques, opérées avec le baromètre. (2) Il a vu les hautes eaux à 21 pouces anglais au-dessous de la pierre du Niton, la plus basse ; ce qui, transformé en valeurs de notre échelle limnimétrique, représente :

Hauteur du lac en août 1775 ZL + 2.494m

Voici la citation de Schuckburgh : « La hauteur du lac, en août 1775, a été mesurée et trouvée de 1 pied 9 pouces (0.533m) au-dessous du sommet de la pierre du Niton du nord, et 3 pieds 9 pouces (1.143m) au-dessous du sommet de celle du sud, et de 249 pieds 1 pouce au-dessous de la boule de la tour sud-occidentale de l'église de St-Pierre. Philosoph. transact, 1777. »

Ces données nous amènent aux chiffres suivants :

Sommet de la grosse pierre à Niton	ZL + 3.619 — 1.143 = 2.476m
Sommet de la petite »	ZL + 3.027 — 0.533 = 2.494m

(1) G.-A. Shuckburgh-Evelyn, physicien anglais, 1751-1804.

(2) *G.-H. Dufour.* Mémoires de 1843, p. 13.

Il y a donc écart de 18mm entre les deux mesures. Nous nous tiendrons à la cote prise sur la petite pierre à Niton, en justifiant cette préference par le fait que c'est sur cette pierre qu'est le repère fondamental de l'hypsométrie suisse et de la limnimétrie du Léman.

Le lac était en hautes eaux quand Shuckburgh a pris les mesures. Etait-ce le maximum de l'année? Nous l'ignorons.

C. Nous avons la cote des basses eaux de 1780, elle est donnée par le trou percé dans la grande pierre du Niton, par M. A. Pictet, qui y fit sceller un bouton de bronze. (1)

Le centre de ce trou est à ZL + 0.804m (MM. L. Gonin et Guiguer de Prangins, mars 1882).

D. Les observations limnimétriques du colonel Mestrezat, dans sa propriété du Creux de Plan, près Vevey ; une échelle de marbre noir, graduée en pieds et pouces de Berne, avait été scellée dans le mur, en 1779, le zéro étant établi à la cote des basses eaux de l'hiver 1778-1779. Une inscription latine, sur une plaque de marbre, fut placée dans le mur en 1793. On y lit :

CAL. APRIL. MDCCLXXIX. Lemanus lacus quam maxime depressus fuit et ab hocce infimo gradu moduli infra conspicui fit initium. III CAL. AUG. MDCCXCII ad altitudinem usque tunc ignotam excrevit.

(Le zéro de ce limnimètre a été placé à la hauteur très basse qu'avaient les eaux du lac le 1er avril 1779. — Le 30 juillet 1792, le lac atteignait une hauteur jusqu'alors inconnue, 8 pieds 10 pouces du limnimètre.)

Cette échelle, restée intacte jusqu'en 1868 a été transportée à sa place actuelle, dans la même propriété du Creux de Plan, avec toutes les précautions nécessaires. pour lui conserver la même hauteur (2) Un nivellement de 1880 a donné la cote absolue du zéro à ZL + 0.241m

Les seules observations de ce limnimètre qui nous aient été conservées, sont les maximums des hautes eaux de 1780 à 1782 et de 1792 à 1825, dont Mestrezat avait envoyé une copie à Genève. (3) Voici ces cotes avec la traduction des pouces de Berne en cotes de l'échelle normale du Léman, d'après l'équation que nous venons d'indiquer.

(1) V. *G.-H. Dufour*, Mémoire de 1837.

(2) Voir pour les détails de cette opération : *F.-A. Forel.* Limnimétrie, V. 15.

(3) Mémoires du général Dufour de 1844.

1780	60 pouces	1.707m	1807	91 pouces	2.465m
1781	81	2.220	1806	76	2.098
1782	90	2.441	1809	92	2.490
....	...	....	1810	73	2.025
1792	106	2.832	1811	82	2.245
1793	87	2.367	1812	75	2.074
1794	96	2.588	1813	64	1.805
1795	72	2.000	1814	72	2.000
1796	75	2.074	1815	63	1.780
1797	78	2.147	1816	105	2.807
1798	62	1.756	1817	108	2.880
1799	86	2.343	1818	81	2.220
1800	61	1.731	1819	67	1.878
1801	64	1.805	1820	81	2.220
1802	92	2.490	1821	90	2.441
1803	54	1.560	1822	78	2.147
1804	86	2.343	1823	78	2.147
1805	78	2.147	1824	90	2.441
1806	88	2.391	1825	66	1.854

E. Nous possédons, d'après une note de Nicod-Delom, (1) quelques cotes des années 1783 à 1786, qui nous donnent, entre autres, les hautes et basses eaux, rapportées à la surface de l'Eperon de l'Aile.

26 juillet 1783	50 pouces de roi	1.353m	sous l'éperon
1 mars 1784	123 —	3.330	—
8 août —	65 —	1.760	—
10 mars 1785	132 —	3.573	—
17 août —	72 —	1.949	—
14 janvier 1786	119 —	3.221	—

D'une autre part, une autre note du même Nicod, dans le cahier de ses observations originales, nous apprend que la ligne fixe de son limnimètre était à 17 pouces de Berne (0.415m) au-dessus de l'éperon, et à 62 pouces de Berne (1.515m) au-dessus des plus hautes eaux de 1817. En adoptant pour ces hautes eaux de 1817 la cote 2.880m, donnée par les observations Mestrezat, et en admettant, ce qui est probable, que les cotes de Nicod se rapportent aux maximums et minimums des eaux, j'en tire les valeurs sur ZL :

(1) Archives de Vevey. 16. W.

	Minimum.	Maximum.	Variation.
1783	—	2.627m	—
1784	0.650m	2.220	1.570m
1785	0.407	2.031	1.624
1785	0.759	—	—

F. Nous avons les observations limnimétriques faites à l'échelle du Port-au-bois de Genève, de 1787 à 1791 (1). Une lettre des syndics de Genève à LL. EE. de Berne, en date du 29 août 1792, (2) nous donne en plus le maximum des eaux de cette année mesuré à la même échelle par 104 ½ pouces de roi. Comme nous avons le même maximum de 1792 par 106 pouces bernois du liminimètre Mestrezat, cela nous permet d'en tirer l'équation (approximative) de l'échelle du Port-au-bois. Son zéro était ZL + 0.003m. Voici les chiffres originaux des observations de l'échelle du Port-au-bois, en pouces du pied de roi.

	Basses eaux.	Hautes eaux.
1787	12 pouces	92 ½ pouces
88	22	83
89	20	82
1790	15	72
91	24	84
92	—	104 ½

La pente du lac jusqu'au Port-au-bois étant à cette époque relativement très faible, j'en déduis, sans autre correction que celle de l'équation de l'échelle, les cotes des maximums, minimums, et variations annuelle.

	Minimum.	Maximum.	Variation.
1787	0.327m	2.504m (3)	2.180m
88	0.598	2.250	1.652
89	0.544	2.223	1.679
1790	0.409	1.952	1.543
91	0.653	2.277	1.624
92	—	2.832	—

(1) *G.-H. Dufour.* 1843, p. 11.

(2) Archives des Ponts et Chaussées de Lausanne.

(3) Cette cote du maximum de 1787 est déduite du chiffre de 92 ½ pouces de l'échelle du Port-au-bois, donné par la lettre des syndics de Genève. Le mémoire du général Dufour donne un autre chiffre pour ce maximum de 1787 à savoir 98 pouces, qui traduit dans notre échelle normale du Léman, amènerait à ZL + 2.656m. Je préfère la cote de la lettre des syndics, comme venant d'un docu-

G. Un limnimètre à flotteur a été établi en 1806 par Paul, dans le bâtiment de la machine hydraulique de Genève. Le zéro de ce limnimètre était d'après le nivellement de Filhon, à ZL — 0.60^{m}. [1] Mais il y a lieu de tenir compte de la pente depuis le lac jusqu'au bassin du limnimètre; j'ai obtenu par une comparaison des minimums annuels de 1818 à 1829, avec les cotes analogues de Vevey, la correction moyenne à appliquer, en temps de basses eaux, aux lectures du limnimètre de la machine pour les transformer en valeurs normales du lac, à savoir — 0.441^{m}. Cela représente une pente moyenne de 159^{mm} (0.600 — 0.441 = 0.159). Voici les chiffres originaux, en pouces de pied de roi, des minimums annuels, d'après les observations de la machine hydraulique.

	Pouces		Pouces		Pouces		Pouces
1806	46	1814	37	1822	38	1830	19
1807	44	1815	40	1823	39	1831	29 1/2
1808	41	1816	47	1824	39	1832	28
1809	45	1817	44	1825	33	1833	29
1810	40	1818	39	1826	27 1/2	1834	24
1811	56	1819	35	1827	32 1/2	1835	26
1812	39	1820	40	1828	33 1/2	1836	29
1813	40	1821	43	1829	27	1837	36

Je tirerai de ces chiffres les valeurs des minimums de 1806 à 1817, et la différence de ces minimums, avec les maximums donnés par les observations Mestrezat, nous fournirait l'amplitude de la variation annuelle. Mais cette dernière valeur serait de beaucoup moins bien assurée que les chiffres analogues des autres séries où les deux valeurs extrêmes proviennent d'observations faites au même instrument; je ne la donne pas dans mon tableau.

Période de 1820 à nos jours. A dater de 1816, nous possédons des observations limnimétriques, plus ou moins régulières, faites dans le lac ou la partie supérieure du port de Genève. Ces observations ont été faites :

ment plus rapproché de l'époque de l'observation; puis, la cote de Dufour nous donnerait, pour la valeur de la variation annuelle de cette année 1787, l'amplitude inadmissible de 2.328^{m}, qui n'a jamais été atteinte par le lac.

[1] *G.-H. Dufour.* Mémoire de 1837.

De 1816 à nos jours aux limnimètres de Vevey, limnimètre à flotteur Nicod-Delom, limnimètre à flotteur Fraisse, etc.

De 1838 à nos jours, aux divers limnimètres qui se sont succédés dans le port de Genève.

De 1843, 1844, 1846 ou 1850 à nos jours, aux divers limnimètres établis à Ouchy, Morges, Nyon, Rolle, Coppet, Chillon, etc., etc.

La coordination de ces diverses observations a été longue et difficile ; elle est même entachée d'une incertitude assez forte pour les plus anciennes observations. Quelle que soit cette incertitude sur le repérage, entre les diverses époques successives de cette longue période, elle n'infirme en rien la comparaison que l'on peut en tirer entre les hautes eaux et les basses eaux, la courbe périodique annuelle ou la variation annuelle. Je me bornerai à indiquer ici les bases de ma limnimétrie, en renvoyant, pour des détails plus circonstanciés, aux mémoires que j'ai publiés sur ce sujet. ([1])

De 1818 à juin 1840, je me suis fondé sur les observations du limnimètre à flotteur Nicod-Delom, à Vevey, en lui attribuant un zéro à ZL + 4.341^{m} ; cette valeur est intermédiaire à celle que j'ai obtenue par une coordination avec les observations simultanées avec l'échelle Mestrezat, maximums de 1816 à 1824, qui me donnait ZL + 4.309^{m}, et à celle de la coordination avec les lectures journalières du limnimètre du Grand-Quai de Genève, années 1838 et 1839, qui me donnait ZL + 4.398^{m}. Le chiffre que j'ai adopté implique une erreur probable de ± 5^{cm}.

De juin 1840 à octobre 1843, j'ai utilisé les observations du limnimètre à flotteur du Grand-Quai de Genève, en corrigeant l'équation de l'appareil, donnée par G.-H. Dufour, de valeurs de 12 à 75^{mm}, représentant la pente variable du Lac jusqu'au Grand-Quai. ([2])

De novembre 1843 à janvier 1850, je me suis adressé aux observations du limnimètre à flotteur de Fraisse, à Ouchy ; j'ai dû leur apporter une petite correction, dont la nécessité m'a été prouvée par la comparaison avec les observations simultanées de Morges et Ouchy, en 1850-1854. Cette correction varie de + 3^{mm} aux basses eaux, à + 54^{mm} aux hautes eaux.

([1]) *F.-A. Forel.* Limnimétrie du Léman, V. p. 16. Bul. S. V. S. N. XVII. 300 sq. 1881. — Etude comparative des coordinations. E. Plantamour et Forel, mai 1881. Documents vaudois du procès du Léman.

([2]) V. *F.-A. Forel.* Limnimétrie du Léman, V, p. 99 (note).

De février 1850 à novembre 1854, j'ai les excellentes observations de Morges, parfaitement repérées par F. Burnier, avec une correction constante de + 25mm, représentant la pente du lac de Morges à Genève.

De décembre 1854 à mars 1876, j'ai choisi les observations du limnimètre à flotteur de Fraisse, à Vevey, en y apportant quelques corrections trop longues à énumérer ici.

D'avril 1876 à décembre 1880, j'ai pris les chiffres de mon limnographe de Morges, en les complétant, là où cela était nécessaire, par ceux du limnographe de Sécheron.

De janvier 1881 à nos jours, j'ai utilisé les valeurs données par le limnographe Ph. Plantamour, à Sécheron, près Genève.

Il est regrettable, et personne ne le sent plus vivement que moi, que nous n'ayons pas eu, pour cette longue série d'années, des observations provenant d'un seul et même instrument; nous eussions évité les difficultés, les incertitudes et les erreurs possibles de coordinations souvent trop compliquées. Mais, dans l'état des documents à notre disposition, je crois pouvoir donner le tableau suivant, comme ce qu'il y a de plus plausible pour la limnimétrie du Léman.

Ce tableau inscrit : la source des observations, les dates et les hauteurs des minimums et des maximums, l'amplitude de la variation annuelle entre les basses eaux de l'hiver et les hautes eaux de l'été suivant, et enfin la moyenne annuelle (moyenne arithmétique des douze moyennes mensuelles de l'année civile. [1]) Toutes ces valeurs, sauf celles de 1739 à 1753, sont rapportées à ZL = RPN — 3.0m.

Tableau général de la limnimétrie du Léman.

Source	Année	Minimum		Maximum		Variation	Moyenne annuelle
		Date	m	Date	m	m	m
Genève. Echelle Maritz.	1739	7 IV	0.649	21 VII	2.517	1.868	—
	1740	9 III	0.406	3 IX	1.867	1.461	—
(Ces chiffres de l'échelle Maritz n'ont qu'une valeur relative. Voyez p. 473.)	1741	29 IV	0.487	5 VIII	1.949	1.462	—
	1742	13 III	0.406	11 VIII	1.867	1.461	—
	1743	12 II	0.487	31 VII	2.030	1.543	—
	1744	29 II	0.324	28 VII	2.030	1.706	—
	1745	17 III	0.568	24 VII	2.030	1.462	—

[1] J'ai cherché quelle est l'erreur commise en prenant pour moyenne de l'année, non pas la moyenne générale des 365 hauteurs journalières, mais la moyenne simple des 12 moyennes mensuelles, qui sont d'importance inégale vu la différence de durée des mois. L'erreur est d'environ 3mm en moins.

Source	Année	Minimum		Maximum		Variation	Moyenne annuelle
		Date	m	Date	m	m	m
Genève. Echelle Maritz.	1746	19 II	0.406	3 VIII	2.111	1.705	—
	1747	24 I	0.568	23 VIII	2.111	1.543	—
	1748	13 III	0.406	31 VII	2.355	1.949	—
	1749	1 I	0.649	9 VIII	2.598	1.949	—
	1750	15 II	0.162	1 IX	2.191	2.030	—
	1751	28 II	0.568	31 VII	2.598	2.030	—
	1752	25 III	0.243	—	2.111	1.868	—
	1753	—	—	—	1.867	—	—
. . . .	. . .	. . . . .	. . .	. . . . .	. . .	. . . .	. . . .
Shuckburgh	1775	—	—	—	2.494	—	—
. . . .	. . .	. . . . .	. .	. . . . .	. . .	. . . .	. . .
Echelle Mestrezat	1779	1 IV	0.241	—	—	—	—
	1780	—	0.804 (1)	—	1.707	—	—
	1781	—	—	—	2.220	—	—
	1782	—	—	—	2.441	—	—
	1783	—	—	26 VII	2.627	—	—
	1784	1 III	0.650	8 VIII	2.220	1.570	—
Observ. Nicod-Delom (éperon de l'Aile, Vevey)	1785	10 III	0.407	17 VIII	2.031	1.624	—
	1786	14 I	0.759	—	—	—	—
	1787	—	0.327	—	2.504 (2)	2.180	—
	1788	—	0.598	—	2.250	1.652	—
Port au Bois, Genève	1789	—	0.544	—	2.223	1.679	—
	1790	—	0.409	—	1.952	1.543	—
	1791	—	0.653	—	2.277	1.624	—
	1792	—	—	30 VII	2.832	—	—
	1793	—	—	—	2.367	—	—
Echelle Mestrezat	1794	—	—	—	2.588	—	—
	1795	—	—	—	2.000	—	—
	1796	—	—	—	2.074	—	—
	1797	—	—	—	2.147	—	—
	1798	—	—	—	1.736	—	—
	1799	—	—	—	2.343	—	—
	1800	—	—	—	1.731	—	—
	1801	—	—	—	1.805	—	—
	1802	—	—	—	2.490	—	—
	1803	—	—	—	1.560	—	—
	1804	—	—	—	2.343	—	—
	1805	—	—	—	2.147	—	—
	1806	3 V	0.804 (3)	4 VIII	2.391	—	—

(1) Bouton M.-A. Pictet sur la grande Pierre du Niton.
(2) D'après la lettre des syndics de Genève.
(3) Les minimums de 1806 à 1816 et les dates des minimums et maximums de la

Source	Année	Minimum		Maximum		Variation	Moyenne annuelle
		Date	m	Date	m	m	m
Echelle Mestrezat et	1807	6 IV	0.750	5 VIII	2.465	—	—
limnimètre de la	1808	20 III	0.669	12 VIII	2.098	—	—
machine hydrauli-	1809	15 IV	0.777	8 VIII	2.490	—	—
que de Genève.	1810	13 II	0.642	18 VIII	2.025	—	—
	1811	1 IV	1.075	1 VIII	2.245	—	—
	1812	4 II	0.614	1 VIII	2.074	—	—
	1813	5 II	0.642	10 VIII	1.805	—	—
	1814	20 III	0.561	4 VIII	2.000	—	—
	1815	20 II	0.642	29 VII	1.780	—	—
Limnimètre Nicod-	1816	6 III	0.831	20 VIII	2.807	—	—
Delom, Vevey	1817	30 IV	0.657	17 VII	2.880	2.223	—
	1818	27 I	0.602	15 VIII	2.259	1.657	1.236
	1819	12 I	0.499	5 VIII	1.946	1.447	1.087
	1820	31 III	0.577	28 VIII	2.264	1.687	1.216
	1821	7 I	0.643	17 VIII	2.472	1.829	1.220
	1822	5 III	0.627	2 IX	2.227	1.600	1.255
	1823	23 I	0.577	24 VII	2.239	1.662	1.342
	1824	16 IV	0.636	16 VIII	2.484	1.848	1.401
	1825	23 II	0.636	16 VIII	1.897	1.261	1.107
	1826	2 IV	0.308	27 VIII	2.150	1.842	1.048
	1827	27 II	0.468	7 VIII	2.282	1.814	1.182
	1828	12 III	0.472	15 VIII	2.270	1.798	1.156
	1829	19 II	0.309	26 IX	1.855	1.546	0.965
	1830	18 II	0.230	9 VIII	2.264	2.034	1.028
	1831	2 II	0.407	12 IX	2.436	2.029	1.253
	1832	16 III	0.297	29 VIII	1.708	1.411	0.797
	1833	28 I	0.321	3 VII	2.019	1.698	1.015
	1834	23 IV	0.429	26 VII	2.173	1.744	1.171
	1835	13 II	0.340	26 VIII	1.946	1.606	0.974
	1836	10 I	0.468	16 VII	2.001	1.533	1.139
	1837	30 III	0.528	14 VIII	2.479	1.951	1.207
	1838	15 II	0.598	30 VII	2.431	1.833	1.310
	1839	13 II	0.549	29 VII	2.370	1.821	1.304
Genève, Grand Quai	1840	5 IV	0.356	18 IX	2.114	1.758	1.215
	1841	11 II	0.797	21 VII	2.555	1.758	1.543
	1842	22 II	0.567	26 VII	2.501	1.934	1.460
Ouchy, limnimètre à	1843	2 IV	1.024	8 VIII	2.579	1.555	1.624
flotteur de Fraisse	1844	30 I	0.804	10 VII	2.020	1.216	1.330
	1845	8 III	0.744	16 VII	2.133	1.389	1.257
	1846	19 III	0.930	19 VII	2.834	1.904	1.604
	1847	20 I	0.724	28 VIII	2.133	1.409	1.257

même période sont tirés des observations du limnimètre de la machine hydraulique de Genève.

	Année	Minimum		Maximum		Variation	Moyenne annuelle
		Date	m	Date	m	m	m
Ouchy, limnimètre à flotteur de Fraisse	1848	5 II	0.744	10 VII	2.063	1.319	1.268
	1849	18 III	0.877	30 VI	2.412	1.535	1.320
Morges, F. Burnier	1850	3 IV	0.755	8 VII	1.935	1.180	1.152
	1851	16 III	0.715	19 VIII	2.355	1.640	1.236
	1852	23 III	0.695	23 VIII	2.345	1.650	1.329
	1853	30 III	0.645	6 VIII	2.395	1.750	1.294
	1854	4 I	0.675	9 VIII	2.075	1.400	1.119
Vevey, limnimètre de Fraisse	1855	20 XI	0.710	18 VII	2.231	1.521	1.386
	1856	25 XII	0.790	23 VIII	2.110	1.320	1.325
	1857	14 III	0.759	18 VIII	1.836	1.077	1.091
	1858	22 II	0.593	21 VIII	1.640	1.047	1.043
	1859	30 I	0.862	13 VIII	2.251	1.389	1.356
	1860	24 II	0.874	6 IX	2.190	1.316	1.535
	1861	23 II	0.998	21 VIII	2.507	1.509	1.476
	1862	27 III	0.919	9 VIII	2.104	1.185	1.312
	1863	30 XII	0.906	6 IX	2.226	1.320	1.520
	1864	16 II	0.941	11 VIII	2.279	1.338	1.470
	1865	13 I	1.030	4 VIII	2.326	1.296	1.576
	1866	13 IV	1.134	14 VIII	2.493	1.259	1.677
	1867	17 III	1.266	6 VII	2.643	1.377	1.770
	1868	29 II	0.903	20 VIII	2.478	1.575	1.557
	1869	8 IV	1.101	7 VIII	2.331	1.230	1.517
	1870	25 II	0.900	12 VIII	2.382	1.482	1.498
	1871	17 I	1.176	26 VII	2.580	1.404	1.643
	1872	5 I	0.963	13 VIII	2.607	1.644	1.629
	1873	23 II	1.137	5 VIII	2.640	1.503	1.616
	1874	17 III	0.796	16 VIII	2.517	1.719	1.428
	1875	4 IV	0.954	13 VII	2.493	1.539	1.682
Morges, limnographe Forel	1876	16 II	0.945	26 —	2.661	1.716	1.672
	1877	11 XI	1.287	26 —	2.761	1.474	1.772
	1878	28 II	1.156	2 IX	2.612	1.456	1.729
	1879	20 III	1.235	16 VII	2.788	1.553	1.776
	1880	17 II	0.985	1 VIII	2.030	1.045	1.430
Sécheron, limnographe Plantamour	1881	25 I	1.121	3 IX	2.480	1.359	1.605
	1882	26 II	0.926	25 VII	2.027	1.101	1.510
	1883	15 III	1.364	17 —	2.594	1.230	1.703
	1884	30 III	0.922	26 —	2.368	1.446	1.388
	1885	31 I	0.846	14 VIII	2.323	1.477	1.546
	1886	2 III	1.182	29 VII	2.241	1.059	1.664
	1887	20 III	1.151	3 VIII	2.344	1.193	1.579
	1888	29 X	1.230	4 —	2.024	0.794	1.657
	1889	19 III	0.915	30 VI	2.110	1.195	1.537
	1890	18 IV	1.242	1 IX	2.103	0.861	1.576
	1891	7 III	1.056	11 VII	1.864	0.808	1.506

En outre des valeurs principales de la limnimétrie du Léman qui sont données par le tableau précédent, j'ai calculé les moyennes mensuelles de la hauteur des eaux pour les années 1818 à 1891. J'ai publié une partie de ces chiffres, jusqu'à décembre 1880, dans le tableau XXI de la Ve partie de ma Limnimétrie du Léman (1). J'y renvoie le lecteur que cela intéressera. Je me borne à donner ci-dessous la suite de ces chiffres, de janvier 1881 à décembre 1891, d'après les observations journalières du limnographe de Sécheron (2).

	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Octob.	Nov.	Déc.
	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
1881	1.191	1.229	1.421	1.572	1.290	1.554	2.148	2.288	2.252	1.539	1.390	1.386
1882	1.186	1.002	1.000	1.130	1.487	1.610	1.873	1.845	1.840	1.802	1 608	1.738
1883	1.831	1.478	1.397	1.446	1.569	1.994	2.384	2.131	1.789	1.537	1.549	1.329
1884	1.066	0.972	0.946	0.958	1.161	1.557	2.067	2.301	2.050	1.494	1.115	0.968
1885	0.900	0.973	1.170	0.965	1.086	1.571	2.066	2.230	1.984	1.949	1.902	1.761
1886	1.358	1.279	1.299	1.507	1.662	1.824	1.983	2.124	1.954	1.666	1.715	1.597
1887	1.535	1.310	1.207	1.250	1.453	1.993	2.280	2.225	1.855	1.160	1.177	1.513
1888	1.352	1 299	1.432	1.699	1.736	1.825	1.781	1.905	1.714	1.803	1.654	1.684
1889	1.575	1.396	1.157	0.956	1.369	1.821	1.984	1.729	1.591	1.695	1.670	1.498
1890	1.503	1.540	1.360	1.295	1.452	1.607	1.798	1.773	1.734	1.577	1.669	1.585
1891	1.375	1.163	1.106	1.170	1.497	1.489	1.753	1.647	1.705	1.738	1.747	1.685

Avant d'en tirer des moyennes générales et des conclusions, nous devons critiquer nous-mêmes notre coordination, et chercher dans quelles limites elle est exacte. Voici quelques observations qui nous serviront à ce sujet.

1° L'équation du limnimètre Nicod-Delom, établi en 1816 à Vevey, peut se tirer de deux manières : ou bien par une comparaison des maximums annuels communs aux observations de Mestrezat, de 1816 à 1824. Cette comparaison me donne pour le zéro du limnimètre Nicod-Delom ZL + 4.309m, différence avec la coordination Forel — 32mm ; le zéro étant supérieur, cela donne à ma coordination des valeurs de 32mm trop élevées. Ou bien, par une comparaison avec les observations simultanées au limnimètre du Grand-Quai de Genève, en apportant à celles-ci une correction convenable pour la pente de la sortie du lac, en moyenne annuelle + 25mm. J'arrive ainsi pour le zéro du limnimètre de Vevey à ZL + 4.398m ; différence avec la coordination Forel + 57mm. (ma coordination serait ainsi de 57mm trop basse.)

Voici les chiffres originaux des minimums et maximums lus de 1816 à 1840 au limnimètre Nicod-Delom, en pouces et lignes de Berne :

(1) Bull. S. V. S. N. t. XVII. p. 390.

(2) Archives de Genève, VII, 463, 1882, XIX, 267, 1888. et années suivantes.

	Minimums	Maximums
1816		65″
1817	(1) (150″9‴)	62
1818	153	85.3‴
1819	157	98
1820	154	85
1821	151.4	76.6
1822	152	86.6
1823	154	86
1824	151.9	76
1825	150	(100)
1826	(158.6)	(95)
1827	158.6	84.3
1828	158.4	84.9
1829	165″	101″9‴
1830	168.6‴	85
1831	161	78
1832	165.6	107.9
1833	164.6	95
1834	160.6	88.9
1835	163.9	98
1836	158.6	95.9
1837	156	76.3
1838	155.6	80.6
1839	157.6	83
1840	165	—

2° La planche Develey. Dans un mémoire du professeur Develey, de septembre 1825, dont nous avons une copie faite de la main de Nicod-Delom de Vevey, (2) est une planche où sont rapportées graphiquement et numériquement les hautes eaux de 1816 à 1825, d'après les observations de Vevey, sur le croquis des deux pierres du Niton et le plan du niveau Shuckburgh. Rien n'indique le procédé du repérage entre Vevey et Genève, mais le travail semble très soigné. Nous en tirons les cotes suivantes que je compare à ma coordination :

Maximums.	Planche Develey.	F.-A. Forel.	Différence.
1816	2.788m	2.753m	— 35mm
17	2.861	2.826	— 35
18	2.336	2.259	— 77
19	1.920	1.946	+ 26
1820	2.262	2.264	+ 2
21	2.494	2.472	— 22
22	2.085	2.227	+ 142
23	2.213	2.239	+ 26
24	2.513	2.484	— 29
25	1.920	1.897	— 23
		Différence moyenne	+ 2.5mm

(1) Les chiffres entre parenthèses sont les cotes extrêmes qui nous sont données à des époques où les observations étaient incomplètes.

(2) Collection des manuscrits de S. Nicod-Delom, propriété de M. M. Morel, avocat, à Lausanne.

Ma coordination serait de 2.5^{mm} trop basse. Si nous écartons de cette comparaison le maximum de 1822, pour lequel il y a manifestement une erreur grave, (1) l'erreur est plus forte, et ma coordination est de 18^{mm} trop basse.

3° Les observations de J. Favre, notaire, à Rolle. Nous pouvons comparer les lectures faites au limnimètre Nicod-Delom, de Vevey, avec celles de J. Favre, notaire à Rolle, faites sur une échelle fixée au mur du jardin Flick, (actuellement jardin Lappé). Favre avait déterminé sur cette échelle la position du niveau Shuckburgh, (maximum de 1775), soit au moyen de nivellements exécutés par Roger, juge à Nyon, amateur, comme Favre, des études naturelles, soit par une lecture simultanée, opérée le 17 août 1824, par Alfred Eynard, à la Pierre du Niton de Genève, et par Favre à Rolle. J'ai retrouvé dans les notes (2) de Favre 47 lectures comparables à celles du limnimètre Nicod-Delom, à savoir : 3 en 1822, 2 en 1824, 21 en 1826 et 21 en 1827.

J'en ai profité tout d'abord pour vérifier que l'équation du limnimètre Nicod-Delom n'a pas changé entre ces dates extrêmes ; en effet, la différence entre les deux séries d'observation ne varie pas systématiquement ; il y a des écarts provenant, soit de dénivellation de l'eau, soit d'erreur de lecture, l'écart maximum étant 91^{mm} ; mais étant donné l'irrégularité des faits à observer, les deux séries sont remarquablement parallèles.

En second lieu, j'en ai tiré l'équation du limnimètre Nicod-Delom, en supposant exact le niveau Shuckburgh, tracé à Rolle, et l'ai trouvé être ZL + 4.369^{m}, ce qui est de 28^{mm} plus élevé que la cote que je lui ai attribuée dans ma coordination. Mais Favre et Eynard, en établissant leur niveau Shuckburgh, ont négligé la pente du lac qui devait certainement avoir une valeur sensible entre le banc du Travers et la pierre du Niton ; je n'essaie pas d'apporter cette correction aux calculs, car j'estime que l'établissement d'une ligne de niveau de Rolle à Genève, basée sur une seule lecture de la hauteur des eaux du lac est trop incertaine. Mais je constate que cette comparaison m'amène à un

(1) L'erreur est dans la planche Develey. En effet, pour Mestrezat les maximums de 1822 à 1823 sont à la même cote ; pour Nicod-Delom, il y a 12^{mm} d'écart ; à la machine hydraulique de Genève, le maximum de 1822 est de 95 pouces, celui de 1823 de 94 pouces ; la planche Develey fait entre ces deux maximums une différence de 128^{mm}.

(2) Notes manuscrites de Favre, Roger et Eynard, bibliothèque de Rolle.

résultat assez satisfaisant; elle indique cependant que mon équation du limnimètre Nicod-Delom serait de quelques centimètres trop basse, que par conséquent les cotes que j'ai tirées des observations de cet instrument devraient être relevées d'autant.

4º Le nivellement de l'ingénieur cantonal vaudois A. Pichard, du 9 avril 1823, [1] établit que l'eau était, au port Tingry (1700^m en amont du banc du Travers, rive gauche) de 25,1 pieds vaudois, sous son plan de comparaison passant à 20 pieds sur le fond de la fosse carrée de la petite pierre du Niton; ce creux étant à RPN — 0,477^m, cela établit l'eau du lac à ZL + 0.993^m. Le limnimètre de Vevey marquant ce jour-là 143 pouces de Berne, cela porte le zéro du limnimètre Nicod-Delom à 4.488^m, et ma coordination serait de 147^{mm} trop élevée.

D'autre part, ce même nivellement nous donne l'eau au pied de la Pierre du Niton à 26 pieds au-dessous de son plan de comparaison. Cette cote de l'eau sous la Pierre du Niton amènerait le zéro du limnimètre Nicod-Delom à 4.218^m, et ma coordination serait de 123^{mm} trop basse, à supposer que la pente de sortie du lac fût nulle. Quelle était la valeur de cette pente? Etait-elle de 9 pouces vaudois, 0.27^m jusqu'à la Pierre du Niton? cela semble impossible à admettre. Je rappelle qu'en basses eaux, la pente jusqu'au Jardin anglais n'est actuellement que de 1 à 2^{cm}.

J'invoquerai pour expliquer ces divergences des erreurs de lecture ou des dénivellations accidentelles du lac. Quoi qu'il en soit, ma coordination tient entre ces deux écarts.

5º Le minimum de 1826 a été extraordinairement bas; on avait enlevé tout le barrage pendant 12 jours, comme nous l'apprend une note de G.-H. Dufour (1843). Dans les registres de la municipalité de Morges, en date du 10 avril 1826, nous lisons: « L'abaissement des eaux est si remarquable au printemps de 1826, que les anciens ne se rappellent pas de l'avoir vu aussi bas. » Le secrétaire municipal S. Pache, fit mesurer par deux pêcheurs la largeur des grèves mises à sec devant plusieurs points de la ville, et les chiffres donnés prouvent le niveau prodigieusement peu élevé de ces eaux. Cela correspond bien aux cotes que donne notre coordination, qui attribue 0.306^m au minimum de 1826, et fait remonter jusqu'à 1779, pour trouver un minimum plus bas que celui-là, par 0.241^m.

[1] Document des archives des Ponts et Chaussées, Lausanne.

Il est vrai que dans son mémoire de 1837, Dufour dit que les eaux de 1826 n'ont été que 9 pouces inférieures au bouton de M.-A. Pictet, ce qui porterait leur cote à 0.760^{m}, et impliquerait une erreur de 0.456^{m} dans notre coordination. Mais je dois croire à une faute d'impression ou d'observation dans cette indication de Dufour ; car la cote de ce minimum à la machine hydraulique a été de 27 $^{1}/_{2}$ pouces, soit ZL + 0.141^{m}, ce qui indiquerait, avec le chiffre de Dufour, une pente de 0.619^{m} entre la Pierre du Niton et la machine hydraulique, ce qui est inadmissible. (1)

6° Dans les années 1816 et 1817, le Léman a eu des crues énormes qui ont vivement attiré l'attention des riverains, inondés sur tous les bords du lac. Un grand nombre de marques ont été faites dans différentes localités qui nous permettent un repérage assez certain. Je vais les indiquer ici, car elles nous donnent une critique intéressante de notre coordination.

a Les observations de Mestrezat, à son échelle du Creux de Plan, Vevey, me donnent les hauteurs :

1816	2.807^{m}
1817	2.880^{m}

b Les marques Pache-Martin, de Morges. La hauteur des maximums de 1816, 1817 et 1846 étaient inscrites par des marques horizontales gravées sur le mur du jardin Pache-Martin, au port de Morges, vis-à-vis de la Douane. Ces marques ont été effacées en 1852 par un récrépissage malencontreux ; mais auparavant, les propriétaires, les notaires S. Pache et S. Martin, avaient eu soin d'en relever la hauteur au-dessus du sol. (2) Nous avons retrouvé en 1880 le sol intact sous le remblai qui le recouvre, et par un nivellement exact nous avons déterminé la hauteur absolue de ces traits qui était :

Maximum de *1817*	2.939^{m}
» de *1816*	2.882
» de *1846*	2.828

c Les marques du port de Nyon. Devant la Douane, sur le mur de droite de l'escalier qui descend au lac sont deux barres horizontales, tracées dans une pierre de calcaire jaune. On les tient à Nyon pour indiquer les hautes eaux de 1816 et 1817. Le quai n'ayant été bâti qu'en 1820, ces marques n'ont pu être faites que par une compa-

(1) Au 1er avril 1837, G.-H. Dufour a trouvé pour la pente du Rhône, entre le Grand quai et la machine hydraulique, 0.203^{m} seulement ; il est impossible qu'en 1826 cette pente ait été de 0.6^{m}.

(2) Voir pour les détails *F.-A. Forel.* Limnimétrie V, p. 27.

raison après coup, ce qui, joint à l'incertitude de leur détermination, ôte beaucoup de leur valeur.

Toujours est-il que d'après un repérage fait par moi-même le 2 avril 1881, ces marques ont les hauteurs limnimétriques suivantes :

La plus élevée (attribuée à *1817*)	2.823m
La plus basse (attribuée à *1816* et *1846*)	2.788

d Les notes de J. Favre, de Rolle, dont j'ai parlé page 486, nous donnent des dates précises sur la hauteur des grandes eaux de 1816 et 1817. Les voici en résumé :

Les lectures simultanées de Favre et Eynard, le 17 août 1824, ont établi la hauteur du sommet du mur Flick à 4.15 pieds vaudois sur le niveau Shuckburgh soit à ZL + 3,742m

Les hautes eaux du 17 juillet 1817 à 2.93 pieds sous le mur Flick, aujourd'hui jardin Lappé, soit ZL + 2.863

Les hautes eaux du 19 août 1816 à 0.26 pied sous le maximum de 1817, soit ZL + 2.785

e La Planche Develey nous indique la hauteur des eaux d'inondation de 1816 et 1817 rapportée au niveau Shuckburgh et aux sommets des deux Pierres du Niton. Voici les valeurs que j'en tire :

	Niveau Shuckburgh.	Petite pierre du Niton.	Grande pierre du Niton.
Hauteur du repère	ZL + 2.494m	+ 3.027m	+ 3.619m
Maximum de *1816*	2.787	2.799	2.765
» *1817*	2.860	2.868	2.843

f Les lectures faites au limnimètre Nicod-Delom donnent pour les hautes eaux de

1816	65 pouces de Berne	1.588m
1817	62 »	1.515m

le zéro du limnimètre étant en haut. Suivant que j'adopte pour l'équation du limnimètre Nicod-Delom les valeurs ZL + 4.309m donnée par la comparaison avec l'échelle Mestrezat, ou ZL + 4.398m obtenu par la comparaison avec le limnimètre du Grand-quai de Genève, ou ZL + 4.341m de ma coordination, j'ai pour les eaux d'inondation des deux années en question les cotes suivantes :

	Coordination avec Mestrezat.	le Grand-quai.	F.-A. Forel.
Zéro Nicod-Delom	ZL + 4.309m	4.398m	4.341m
Maximum de *1816*	2.721	2.810	2.753
» *1817*	2.794	2.883	2.826

Si, enfin, je fais intervenir le fait qui me paraît certain que, entre l'année 1816 date de la construction du limnimètre Nicod et l'année 1818, il y a eu un affaissement d'environ 4 pouces de Berne (98^{mm}) du terrain ou de la maçonnerie du limnimètre, j'arrive à apporter une correction importante aux lectures originales de ces deux années ; au lieu de 65 et 62 pouces je lirais au limnimètre Nicod :

Maximum de 1816	61 pouces
— 1817	58 —

En admettant qu'il y ait eu 166 pouces de différence de niveau entre les zéros des limnimètres Nicod et Mestrezat, et en adoptant pour ce dernier l'équation ZL + 0.241^{m}, cela me donne en définitive les cotes probables :

Maximum de 1816	2.813^{m}
— 1817	2.886

En résumé, nous avons par ces divers procédés la hauteur des eaux d'inondation de 1816 et 1817 aux cotes suivantes de l'échelle normale du lac :

	1816	*1817*
Observations Mestrezat	2.807^{m}	2.880^{m}
Marques du Port de Morges (Pâche-Martin)	2.882	2.939
Marques du Port de Nyon	2.788	2.823
Notes J. Favre, de Rolle	2.785	2.863
Planche Develey (niveau Shuckburgh)	2.799	2.860
Observations Nicod-Delom (coordination Mestrezat)	2.721	2.794
— (coord. L. Grand-quai)	2.810	2.883
— (correction Forel)	2.813	2.886
Moyennes	2.799^{m}	2.866^{m}

Le zéro du limnimètre Nicod-Delom que j'ai adopté dans ma coordination à ZL + 4.341^{m} me donnant les cotes de 1816 par 2.753^{m}, de 1817 par 2.826^{m}, mon zéro serait d'après ces chiffres de 46 ou 40^{mm} trop bas, et les valeurs que j'en ai tirées devraient être relevées en moyenne de 43^{mm}.

— Je rappelle ici le fait, déjà signalé page 242 : il semblerait que les hautes eaux de 1816 et 1817 auraient été plus élevées du côté de Genève que dans le Grand-lac. Les coordinations faites à Genève à l'occasion du procès du Léman arrivent à des chiffres beaucoup plus

élevés que ceux que je trouve par les observations ci-dessus développées. (1)

a Dans la Réponse de Genève, planche IV, tableau graphique :

Maximum	de *1816*	2.995^m
—	de *1817*	3,017

b M. H. de Saussure a déduit (La question du lac, p. 20) d'observations et de témoignages recueillis à Genthod que les eaux de 1816 et 1817 se seraient élevées à 20 ou 30^{cm} au-dessus du repère de la Pierre du Niton.

c E. Plantamour, dans son mémoire de 1881, relève encore les maximums de 1816 et 1817 et leur donne les cotes 3.093 et 3.098^m au Jardin anglais, hauteur à laquelle il faudrait encore ajouter la pente du lac jusqu'au Jardin anglais.

d Enfin les témoignages unanimes d'une vingtaine de vieillards âgés de 80 ans et plus qui ont paru devant le tribunal fédéral dans la séance du 20 juin 1882, ont tous déclaré qu'en 1816 et 1817 les eaux avaient couvert la Pierre du Niton la plus basse. Tout en faisant la part de quelques exagérations bien explicables quand on fait appel à des souvenirs aussi lointains, il me paraît que c'est un fait établi que dans l'une de ces deux années, 1817 probablement, l'eau a dépassé le repère de la Pierre du Niton.

Il y a une grande différence entre ces deux séries de chiffres. D'une part les observations faites dans la partie orientale du lac laissent les maximums de 1817 et surtout celui de 1816 à 10 ou 20^{cm} au-dessous de RPN. D'une autre part, les souvenirs encore présents de témoins oculaires disent qu'à Genève les hautes eaux ont couvert la Pierre du Niton. Les premières sont aussi certaines que peuvent l'être des faits aussi éloignés ; les secondes ne peuvent être suspectes, vu la solennité du lieu où le témoignagea été produit.

Peut-on expliquer cette divergence par des dénivellations locales dues à la bise qui aurait refoulé les eaux à Genève ; (2) faut-il faire in-

(1) Les lectures faites au limnimètre à flotteur de la Machine hydraulique donnent pour le maximum de 1816 119 1/4 pouces du pied de roi, pour le maximum de 1817, 119 1/2 pouces. Le zéro du limnimètre étant à ZL — 0.60^m, ces cotes représentent une hauteur d'eau de ZL + 2.574^m et 2.580^m. A ces valeurs, il faut ajouter la pente de l'eau depuis le banc du Travers jusqu'à la Machine hydraulique. Il n'est pas probable que cette pente ait dépassé 30 à 40^{cm}, ce qui rapprocherait ces chiffres de notre coordination plutôt que de celle des Genevois.

(2) Les observations météorologiques de l'époque s'opposent à cette explication.

tervenir des seiches qui auraient temporairement submergé la Pierre du Niton ? Ou bien faut-il avoir recours à un mouvement géologique local qui depuis 1817 aurait soulevé la région de Genève ou abaissé la région du Grand-lac ? Je n'ose vraiment pas choisir entre ces explications d'un fait inexplicable.

— Quoi qu'il en soit, en laissant ouvert ce problème de la divergence entre les observations genevoises et les observations vaudoises des maximums de 1816 et 1817, je crois pouvoir conclure, en me basant sur les comparaisons et contrôles dont nous disposons actuellement, que, pour les époques antérieures à 1840, les coordinations de ma limnimétrie sont justes, probablement à quelques centimètres près, avec une tendance à être un peu trop basses. C'est la même conclusion à laquelle est arrivé, par une toute autre méthode,(1) M. l'ingénieur A. Burkli-Ziegler, de Zurich, expert du Tribunal fédéral chargé de l'étude de la limnimétrie dans le procès du Léman.(2)

Pour les années postérieures à 1840, nous avons un grand nombre de contrôles à notre disposition. Il serait oiseux de les énumérer et de les discuter. Notre limnimétrie est aussi exacte que peut l'être un résumé d'observations de cette nature. Sa précision augmente à mesure que l'on se rapproche des époques contemporaines ; elle est parfaite depuis l'ère des limnographes, à partir de 1876.

VARIATIONS PÉRIODIQUES ET ACCIDENTELLES

Reprenons maintenant les chiffres obtenus pour la limnimétrie du Léman, et étudions les faits généraux qui peuvent nous intéresser, à savoir :

Le maximum de 1816 a eu lieu le 20 août : du 15 au 18 août, le vent sudois a régné ; du 19 au 26, le vent du nord ; mais celui-ci était peu intense, tellement que chaque matin le calme reprenait, excepté dans les journées du 20, 24 et 26, où les notes de l'Observatoire inscrivent NE pour toute la journée. C'était un temps de calme avec tendance à une bise peu accentuée. Ce n'était pas une forte bise. — Le maximum de 1817 a eu lieu le 16 juillet à Genève, le 17 juillet à Vevey. Le sudois a régné pendant tout le mois jusqu'au 24, la bise du 24 au 30 ; le 24, le lac avait déjà baissé de 16cm ; et le maximum était dépassé depuis longtemps. Il faut donc écarter l'effet de la bise pour expliquer la divergence entre les observations du Grand-lac et celles de Genève.

(1) La méthode employée par M. Bürkli est la superposition de courbes graphiques tirées des observations faites aux divers limnimètres, en remontant des échelles repérées à celles qui ne l'étaient pas.

(2) Communication verbale de M. Bürkli.

Les variations périodiques journalières.
Les variations périodiques annuelles.
Les variations périodiques cycliques.
Les variations systématiques ou séculaires.
Les variations accidentelles.

1. VARIATION PÉRIODIQUE JOURNALIÈRE

Y a-t-il dans la hauteur du lac une périodicité correspondant à la journée de 24 heures ? Un maximum diurne ou nocturne ? A cette question, la réponse est sans hésitation négative. Cette variation périodique est insensible.

A quoi serait-elle due ? A des variations journalières dans le débit des affluents. Ces variations existent, cela est incontestable. Pendant la phase diurne de la journée, les neiges et glaciers fondent avec plus d'activité que pendant la phase nocturne. Chaque torrent glaciaire subit une crue sensible en été, dans l'après-midi de chaque journée de beau temps chaud. Mais la longueur du cours des divers affluents étant différente, la durée du parcours de l'eau des diverses sources glaciaires du fleuve est, de même, différente ; ces diverses crues partielles se compensent plus ou moins, de telle sorte que le Rhône, le seul affluent du lac qui soit à considérer dans cette question, intégrant toutes ces variations élémentaires, ne montre plus dans son cours inférieur de périodicité journalière appréciable. Les quelques observateurs que j'ai pu consulter à ce sujet n'ont pu m'indiquer l'heure d'une crue régulière du Rhône, ou plutôt, ils m'ont donné chacun une heure différente pour le moment du maximum, les uns le matin, les autres le soir, les uns à midi, les autres à minuit, ce qui prouve qu'il n'y a aucune constance dans le phénomène.

Le débit du seul affluent dont la variation pourrait être active sur le lac étant ainsi relativement uniforme, et aucune autre cause de variation n'apparaissant probable, il n'y a pas à chercher de variation périodique journalière dans la hauteur du lac. Et dans le fait, jamais les courbes des limnographes ne nous en ont montré d'indices.

Je dois cependant noter ici deux citations qui affirment l'existence d'une crue périodique journalière, soit du Rhône, soit du lac. La première est tirée d'un article du journal *Le Confédéré du Valais* : (1)

(1) Reproduit dans le *Nouvelliste vaudois* du 18 septembre 1880.

« En été le Rhône a régulièrement chaque jour ses heures de crois-
» sance et de décroissance, dans une assez large mesure ; à son arri-
» vée au lac, il commence à croître vers minuit ; cette crue augmente
» jusqu'à 10 h. du matin ; depuis cette heure, il décroît jusqu'à mi-
» nuit, la chaleur du jour ne faisant sentir son arrivée au lac que le
» lendemain matin, de minuit à 10 h. »

La deuxième citation est tirée d'un travail de S. Nicod-Delom de Vevey, présenté le 1er mai 1833 à la Société vaudoise des sciences naturelles : ([1]) « En été, lorsque la hauteur de la surface du lac est res-
» tée 4 ou 5 jours stationnaire, que les affluents, le Rhône compris,
» n'ont subi aucune augmentation ou crue momentanée, que le temps
» était au beau et bien calme, le ciel sans nuage, la température
» à 21° R, entre 2 et 3 h. après-midi, le limnimètre observé le matin
» et puis le soir indiquait une baisse de 3/4 de pouce de la surface du
» lac que je présume être produite par l'évaporation (?), ayant répété
» plusieurs fois l'observation dans les mêmes circonstances ».

2° VARIATION PÉRIODIQUE ANNUELLE

Rappelons en commençant deux faits fondamentaux :

a Pour étudier le régime naturel du Léman, nous devons nous adresser à la limnimétrie antérieure aux grands travaux modernes de la régularisation du lac, antérieure par conséquent à l'année 1884. Le régime actuel du lac est presque entièrement artificiel, et si nous voulons nous occuper des faits naturels, nous devons parler au passé.

b Même en nous limitant à la limnimétrie antérieure à 1884, nous devons nous souvenir que depuis 1713, et peut-être même auparavant, le Léman n'est plus un lac sauvage ; que des digues et artifices ont été établis sur son émissaire et que, en particulier, des barrages mobiles relevaient les eaux de l'hiver, ou plutôt empêchaient les basses eaux de s'abaisser à leur niveau naturel, et diminuaient ainsi l'amplitude de la variation annuelle. Le développement des artifices de Genève ayant été progressif, plus haut nous pourrons remonter dans le passé, plus près nous nous rapprocherons de l'état de nature qui nous intéresse actuellement.

Quoi qu'il en soit, dans les faits à nous connus, nous constatons

([1]) Dossier Nicod-Delom, chez M. M. Morel, avocat à Lausanne.

une variation périodique parfaitement marquée ; elle eût été plus forte si le lac avait été à l'état sauvage.

Dans son mémoire de 1881, où il analyse les observations limnimétriques de Genève, de 1838 à 1880, E. Plantamour donne la courbe des variations annuelles dans la formule suivante, où h représente la hauteur du lac au-dessus et au-dessous de la moyenne ZL + 1.4312^{m}, M représente la date exprimée en degrés sexagésimaux, l'année entière étant comptée pour 360° :

$$h = 1.4312^{m} + 0.5434^{m} \sin (M + 231°,2') + 0.1739^{m} \sin (2\,M + 26°,21.5') + 0.0474^{m} \sin (3\,M + 167°,12'),$$

l'erreur entre les résultats du calcul et les observations, étant de $\pm$ 9^{mm}.

Cette formule n'est pas d'un usage très facile. Pour la plus grande commodité du lecteur, je préfère lui donner ici la courbe sous une autre forme. Je tirerai des moyennes mensuelles des années 1818 à 1880 les moyennes générales qui sont les suivantes :

Janvier	0.928^{m}	Juillet	2.032^{m}
Février	0.888	Août	2.136
Mars	0.900	Septembre	1.876
Avril	0.991	Octobre	1.432
Mai	1.204	Novembre	1.160
Juin	1.611	Décembre	1.030

Ces chiffres qui se traduisent par une courbe assez régulière (fig. 39) suffiront à ma démonstration.

On y voit que les eaux du lac étaient basses en hiver, et hautes en été ; que, entre la moyenne du mois le plus élevé et celle du mois le plus bas, il y a une différence notable :

Moyenne d'août	2.136^{m}		
» de février	0.888	différence	1.248^{m}

Si au lieu de nous adresser aux moyennes mensuelles, nous prenons les cotes des maximums et celles des minimums, nous avons ce que nous appelons la variation annuelle.

Moyenne des maximums	2.284^{m}		
Moyenne des minimums	0.742	différence	1.542^{m}

La plus forte variation annuelle connue est celle :

du maximum de 1817	2.880^{m}		
au minimum de 1818	0.602^{m}	différence	2.278^{m}

La plus faible variation annuelle est celle :
du maximum de 1882 2.027m
au minimum de 1883 1.364m différence 0.663m

La variation de la variation annuelle a donc été :
la plus forte, celle de 1817-1818 2.278m
la plus faible, celle de 1882-1883 0.663m différence 1.615m

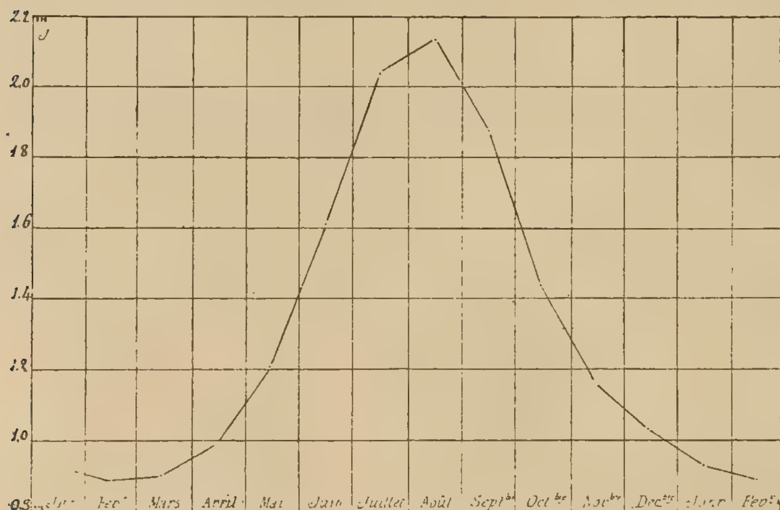


Fig. 39. Courbe normale du lac, d'après les moyennes mensuelles de 1818 à 1890.
1 mm. = 2 cm. de hauteur du lac.

Le minimum le plus bas connu par des observations limnimétriques est celui du 18 février 1830 (1) par 0.224m. Le maximum le plus élevé est celui du 16 juillet 1817 par 2.886m. (2) La différence entre ces deux chiffres, ce que nous appellerons la variation extrême, est de 2.662m.

Quant à la date des extrêmes de hauteur, voici ce que je tire des faits connus, de 1806 à 1883 :

(1) La digue est restée ouverte presque tout l'hiver de 1830 (note de G.-H. Dufour 1843). D'une autre part, les conditions extraordinaires de cet hiver, gelée très intense et prolongée, avaient mis à l'étiage tous les affluents du lac. Ces eaux de 1830 ont été très basses dans tous les lacs suisses.

(2) J'ai pris pour le maximum de 1817 la cote du lac au limnimètre Nicod à Vevey, en y apportant la correction nécessitée par l'affaissement de 4 pouces de l'échelle (v. p. 490). Ces deux chiffres extrêmes sont tirés des observations du même limnimètre, celui de Nicod-Delom à Vevey, et sont donc parfaitement comparables, la même correction leur ayant été appliquée.

La date du minimum est en moyenne le 24 février, mais cette date varie entre des extrêmes assez éloignés. C'est ainsi que le minimum a eu lieu :

en novembre	1 fois	(11 novembre 1876)
en décembre	3 —	
en janvier	15 —	
en février	26 —	
en mars	19 —	
en avril	13 —	
en mai	1 —	(3 mai 1806)

J'ai recherché s'il y a eu quelque chose de systématique dans ces variations et j'ai trouvé pour la date moyenne du minimum : [1]

de 1806 à 1820	11 mars
de 1821 à 1840	27 février.
de 1841 à 1860	14 février
de 1861 à 1883	19 février

Le minimum est notablement plus hâtif dans la deuxième moitié de la période que dans la première.

La date du maximum est en moyenne le 8 août. Le maximum a eu lieu :

en juin	1 fois	(30 juin 1849)
en juillet	24 —	
en août	45 —	
en septembre	8 —	(la date la plus reculée étant le 26 septembre 1829)

Quant à une variation systématique de l'époque des maximums, elle n'est pas apparente. En effet la date moyenne a été : [2]

de 1806 à 1820	le 8 août
de 1821 à 1840	le 16 août
de 1841 à 1860	le 3 août
de 1861 à 1883	le 6 août

Depuis 1884, le régime du lac est purement artificiel, et la date des extrêmes n'a plus d'intérêt pour l'étude des faits naturels. Notons cependant, à titre de curiosité, la date extraordinairement hâtive du minimum de l'hiver de 1887-88, qui a eu lieu le 29 octobre 1887.

[1] J'ajoute ici que les dates, malheureusement trop peu serrées que j'ai du XVIIIe siècle (18 années seulement, dont 14 sont très peu précises) me donnent, pour la moyenne des minimums, le 3 mars.

[2] Avec les mêmes réserves que pour les minimums, les maximums du XVIIIe siècle dont j'ai l'époque (17 années) me donnent la date moyenne du 7 août.

Dans le régime bien réglé de l'avenir, le minimum aura toujours lieu en avril.

Le régime naturel du Léman peut donc se caractériser comme suit: Basses eaux en hiver avec minimum en février, crue pendant le printemps, hautes eaux en été avec maximum en août, décrue pendant l'automne.

Quelle est la cause de ces variations périodiques annuelles ?

Les manœuvres des barrages de l'émissaire ont pour but et pour action de lutter contre cette variation ; elles tendent à la restreindre ; elles n'en sont donc pas la cause. Celle-ci doit se chercher uniquement dans des faits naturels.

Les variations du débit de l'émissaire, à l'état de nature, non modifié par les travaux de l'industrie humaine, étant en fonction directe de la hauteur du lac, les causes essentielles de la variation annuelle d'un lac sauvage doivent être cherchées uniquement dans les variations des affluents. Les affluents du lac sont :

1° L'eau atmosphérique qui tombe directement dans le lac sous forme de pluie, de neige ou de grêle.

2° L'eau qui se condense à la surface du lac quand la température de l'eau est plus basse que la température de saturation de l'air.

3° Les rivières affluant dans le lac, à savoir le Rhône du Valais et les rivières qui se versent directement dans le lac.

4° Les sources sous-lacustres.

De l'eau apportée par ces divers affluents nous avons à déduire l'eau qui est enlevée par évaporation dans l'atmosphère, quand la température du lac est plus élevée que la température de saturation de l'air.

Les facteurs climatologiques qui agissent sur les affluents sont variables dans la période annuelle, à savoir :

La pluie présente dans notre contrée un maximum annuel en automne, à l'époque où le lac est déjà en forte décrue.

La condensation à la surface n'a guère lieu qu'au printemps ; elle est de valeur minime.

Les rivières affluentes ont un régime fort différent suivant leur origine, et doivent être divisées en deux classes :

A Les affluents de la plaine et des montagnes basses sont à l'étiage en hiver, pendant les grandes gelées, et en été, pendant la saison sè-

che ; leurs crues ont lieu au printemps, lors de la fonte des neiges, et en automne, lors des pluies diluviennes de l'arrière saison.

B. Le Rhône, fleuve alpin, est alimenté essentiellement par les glaciers et les neiges éternelles qui fondent rapidement sous l'action des chaleurs de l'été. Nous avons étudié le régime du Rhône, qui a sa grande crue au printemps et en été, crue qui correspond à celle du lac.

Quant aux sources sous-lacustres, nous n'en parlons que pour mémoire ; nous n'en connaissons avec certitude aucune qui ait une certaine importance.

L'évaporation enlève pendant toute l'année de l'eau à la surface du lac, sauf pendant quelques semaines du printemps. Son effet maximal a-t-il lieu en été, alors que l'air, très chaud, a une grande puissance hygrométrique, ou en automne et en hiver, alors que la différence de température entre l'air et l'eau est à son maximum ? La question pourrait se poser. Son effet est du reste de valeur minime, comme celui de la condensation.

Si nous comparons ces diverses périodicités des divers ordres d'affluents avec les variations de hauteur des eaux du lac, nous voyons que c'est, en somme, le Rhône du Valais qui seul détermine la crue estivale du Léman. C'est la fonte des neiges et des glaciers qui cause la crue du fleuve, et celle-ci la hausse des eaux du lac. Pendant les trois quarts de l'année, la pluie tombe en neige sur les sommets glacés ; c'est seulement pendant les mois d'été que la chaleur transforme cette glace en eau, et lui permet de s'écouler dans la plaine. Le lac Léman, avec sa crue estivale, est donc un lac alpin ; c'est, au point de vue de la hauteur des eaux, ce qui le caractérise. Analysons plus en détail le phénomène.

La variation normale du Léman montrant une crue printanière de février en août, il s'en suit que, dans cette moitié de l'année, le débit des affluents est supérieur à celui de l'émissaire. La décrue automnale d'août en février, indique que dans cette saison, c'est le débit de l'émissaire qui est le plus fort. Si dans notre tableau de la page 495 qui donne les valeurs mensuelles de la hauteur du lac, nous faisons les différences d'un mois à l'autre, nous aurons les allures de cette variation.

	Variation		Excès du débit des affluents.
De janvier à février	— 40^{mm}	en décrue	— 9.0$^{m3\ sec}$
de février à mars	+ 12	en crue	+ 0.5
de mars à avril	+ 91	id.	+ 19.7
d'avril à mai	+ 213	id.	+ 47.2
de mai à juin	+ 407	id.	+ 88.3
de juin à juillet	+ 421	id.	+ 94.7
de juillet à août	+ 104	id.	+ 22.5
d'août à septembre	— 260	en décrue	— 54.4
de septembre à octobre	— 444	id.	— 99.9
d'octobre à novembre	— 272	id.	— 59.0
de novembre à décembre	— 130	id.	— 29.2
de décembre à janvier	— 102	id.	— 22.1

La crue la plus rapide a lieu de juin à juillet, à raison de 421^{mm} par mois, soit 13.6^{mm} par jour, ce qui représente un excès de débit des affluents de 94.7$^{m3\ sec}$. La décrue la plus rapide a lieu de septembre à octobre, à raison de 444^{mm} par mois, soit 14.8^{mm} par jour, ce qui représente un excès de débit de l'émissaire de 99.9$^{m3\ sec}$.

Ces allures nous apprennent que la variation annuelle de la hauteur des eaux du Léman n'est pas régie uniquement par les chutes d'eau qui tombent sur le bassin d'alimentation. En effet, l'étude pluviométrique, que nous avons résumée aux pages 294 et 296 de ce volume, nous a montré que, si l'hiver est la saison la plus sèche, les grandes chutes d'eau ont lieu dans nos climats en été et en automne ; que les pluies de l'automne sont presque égales en puissance à celles de l'été, les dépassent même dans certaines stations. Or nous voyons le lac baisser normalement déjà au mois d'août. Il y a donc une autre action qui s'additionne à celle des pluies, et la dépasse en importance. C'est l'action de la chaleur qui fait fondre les neiges hivernales.

Pour mieux comprendre cette action de la chaleur sur le régime du lac, reportons-nous aux faits que nous avons constatés dans notre étude climatologique du bassin du Léman. Cherchons à calculer l'altitude de l'isotherme zéro dans les divers mois ; cela nous donnera la limite du pays où la neige est fondante et où l'eau atmosphérique tombe en pluie, d'une part, et du pays où tout est gelé. Cela nous permettra d'évaluer d'après les chiffres de la page 349 la superficie

de la région où tout est gelé et où l'eau tombe sous forme de neige et ne s'écoule pas actuellement dans les rivières. Dans le tableau suivant, je donne pour chaque mois :

a la température moyenne au bord du Léman d'après les chiffres de la page 277.

b la quantité dont il faut s'élever dans la montagne pour avoir un abaissement de la température de l'air de 1°, d'après la comparaison des observations de Genève et du Grand Saint-Bernard que nous avons résumées page 280.

c l'altitude de l'isotherme zéro, obtenue en multipliant les chiffres des deux premières colonnes et en y ajoutant 375m, altitude de la nappe du Léman.

d la superficie de la partie du bassin du Léman qui est au-dessus et celle qui est au-dessous de l'isotherme zéro, d'après les chiffres résumés à la page 349.

	Température de l'air au bord du Léman	Altitude amenant l'abaissement de 1°	Altitude de l'isotherme Zéro	Superficie du bassin au-dessus de l'isotherme Zéro	Superficie du bassin au-dessous de l'isotherme Zéro
Janvier	0.8°	211m	544m	7400km²	600km²
Février	2.1	212	819	6800	1200
Mars	4.7	181	1226	5000	3000
Avril	9.5	168	1971	4000	4000
Mai	13.2	171	2632	2300	5700
Juin	16.8	168	3197	1700	6300
Juillet	18.9	175	3682	1100	6900
Août	18.1	179	3615	1200	6800
Septembre	15.0	182	3105	1800	6200
Octobre	10.3	197	2404	2600	5400
Novembre	4.6	214	1379	4700	3300
Décembre	0.8	261	683	6300	1700

D'après ces chiffres, on voit que l'isotherme zéro, c'est-à-dire la limite inférieure du pays ou règne la gelée, s'élève progressivement dans la première moitié de l'année, et s'abaisse dans la seconde; qu'elle passe de l'altitude absolue 540m en janvier, à 3680m en juillet. Il en résulte les conséquences suivantes :

a Dans la saison printanière, la zone dégelée va en augmentant d'étendue ; c'est-à-dire que la partie du territoire sur laquelle l'eau météorique tombe en pluie s'accroît progressivement; la zone dégelée

n'est en moyenne que de 600$^{km^2}$ en janvier, elle est de 6900$^{km^2}$ en juillet. L'eau qui tombe en pluie s'écoulant directement dans les affluents, le débit de ceux-ci va en augmentant. — Dans la saison automnale, l'effet inverse se produit et le débit des affluents va en diminuant.

b Dans la saison hivernale, la neige s'accumule sur la zone gelée et y reste à l'état solide jusqu'au printemps où elle est fondue par la chaleur ; les parties basses du pays sont peu longtemps au-dessus de l'isotherme zéro, et par conséquent la neige y devient moins épaisse que dans les parties hautes qui sont gelées pendant 6 mois, 8 mois, 10 mois et où la neige acquiert des épaisseurs considérables. [1] Par conséquent à mesure que, dans la saison printanière, l'isotherme zéro s'élève, la chaleur fait fondre des masses de neige accumulées depuis plus longtemps et par suite plus épaisses; à mesure que la saison printanière s'avance, la fusion de la neige hivernale représente la transformation en eau de la neige entassée depuis un plus grand nombre de mois. De ce fait, le débit des affluents va progressivement en augmentant dans la première moitié de l'année.

Cela est surtout évident pour les glaciers et neiges éternelles des sommets des Alpes. Ces grandes accumulations d'eau à l'état solide occupent une région où la chute annuelle de neige dépasse en valeur la fusion estivale, et où l'épaisseur de la couche glacée s'accroîtrait indéfiniment si celle-ci ne descendait pas mécaniquement dans le fond des vallées par l'avalanche neigeuse et par l'écoulement du glacier (écoulement de la masse plastique). Les neiges des hauts sommets sont donc amenées dans les vallées où la chaleur de l'été les transforme en eau et de là elles arrivent dans la plaine par le canal des torrents glaciaires. Mais cette liquéfaction n'a lieu que dans la saison fort courte où l'isotherme zéro s'élève au-dessus de la partie terminale des glaciers ; pendant ces quelques semaines, quelques mois à peine,

[1] En nombres ronds, on peut, de notre tableau de la position des isothermes, déduire que la saison où normalement tout est gelé dure

à l'altitude de	500^m	$^1/_2$ mois.
	1000	3 —
	1500	5 —
	2000	6 —
	2500	7 —
	3000	8 —
	3500	10 —
	4000	12 —

la neige tombée durant toute l'année sur la région alpine supérieure doit être évacuée. Les torrents glaciaires reçoivent donc pendant la saison estivale un afflux considérable d'eau qui se déverse dans les fleuves alpins. Or nous avons vu que, pour le bassin du Rhône, les glaciers et neiges éternelles représentent environ 1000^{km^2} de superficie, le huitième du bassin total d'alimentation du Léman. L'eau météorique tombée pendant les douze mois de l'année sur un huitième de la superficie du bassin doit donc s'écouler en quelques mois d'été. De là la grande crue estivale du Rhône du Valais.

c D'une autre part nous savons que les chutes de pluie sont plus fréquentes (v. p. 294) et plus abondantes (p. 295) en été qu'en hiver. De ce fait, il résulte que le débit des affluents doit aller en croissant dans la saison printanière, en décroissant dans la saison automnale.

d Si l'on combine ces trois facteurs, on verra que le débit des affluents doit subir une crue générale au printemps, une décrue générale en automne ; que par conséquent il y a, dans l'alimentation du lac par les affluents, les conditions suffisantes pour la production d'une crue printanière et d'une décrue automnale.

Mais cette variation dans le débit des affluents ne suffit pas à faire comprendre le caractère et les allures de la variation du lac. Un second ordre de faits intervient, à savoir la variation du débit de l'émissaire. Celui-ci, indépendamment des manœuvres des barrages artificiels, varie en fonction de la hauteur des eaux du lac : quand les eaux sont basses, le débit de l'émissaire est faible ; quand les eaux sont hautes, il est fort. Il en résulte qu'au début de la saison printanière, quand les affluents sont gonflés par la fonte des neiges de plaine, le niveau du lac est encore fort bas, le débit de l'émissaire est faible et le lac monte rapidement. A mesure que le lac s'élève, le débit de l'émissaire s'accroît et, à la fin de la saison printanière, il devient assez fort pour être égal à celui des affluents, même gonflés par la fonte des glaciers et des neiges dites éternelles ; le lac cesse alors de croître et le maximum estival est atteint. Au commencement de la saison automnale, le lac étant encore très haut, le débit de l'émissaire est encore énorme ; les affluents réduisent leur apport, le laissent tomber au-dessous de celui de l'émissaire, et le lac s'abaisse rapidement. La rapidité de la décrue du lac va en s'atténuant à mesure que l'on arrive dans les cotes plus basses du lac, car alors le débit de l'émissaire se réduit tellement qu'il

ne dépasse que peu et finit par ne plus dépasser le débit des affluents, quelque minime que soit devenu ce dernier. Le minimum hivernal est alors atteint.

Ces variations inverses dans le débit des affluents et de l'émissaire seront élucidées par le tableau suivant, dans lequel, sans donner les chiffres intermédiaires du calcul, j'ai réuni :

a le débit de l'émissaire d'après les valeurs du tableau de la page 440.

b le débit des affluents calculé d'après la crue positive ou négative du lac d'un mois à l'autre, ce qui nous donne la différence entre le débit des affluents et celui de l'émissaire (la méthode du calcul est indiquée page 357).

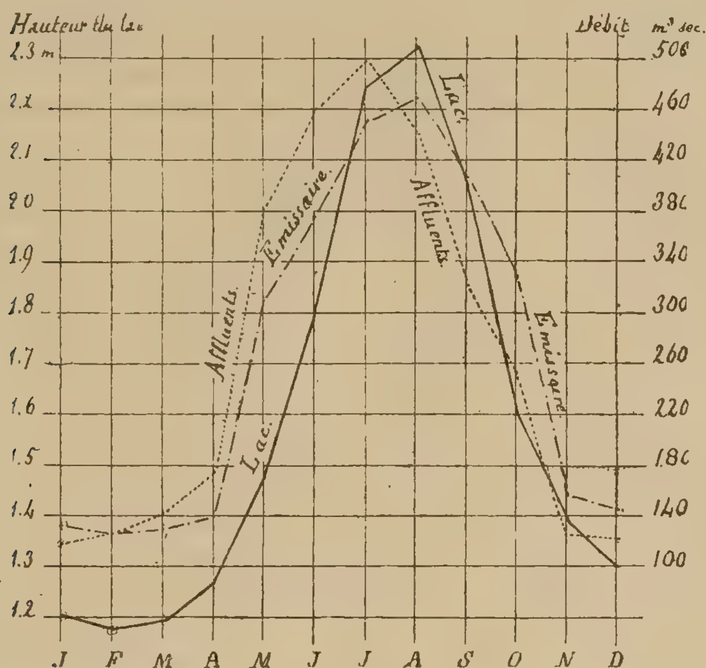
c Cette différence entre le débit des affluents et celui de l'émissaire, positive quand le premier dépasse le second, c'est-à-dire quand le lac s'élève, et vice-versa.

	Débit de l'émissaire.	Débit des affluents.	Différence. (1)	Crue du lac.
Janvier	133^m3 sec	118^m3 sec	— 15^m3 sec	— 70^mm
Février	126	126	0	— 2
Mars	130	141	+ 11	+ 52
Avril	140	174	+ 34	+ 149
Mai	312	382	+ 70	+ 324
Juin	375	459	+ 84	+ 372
Juillet	448	495	+ 47	+ 215
Août	467	442	— 25	— 115
Septembre	405	321	— 84	— 375
Octobre	326	254	— 72	— 330
Novembre	155	125	— 30	— 135
Décembre	144	122	— 18	— 85

La figure 40 qui est tracée d'après ces chiffres montre fort bien les relations entre la crue des affluents et celle de l'émissaire, et les rapports entre ces valeurs relatives et la crue du lac. Le lac s'élève aussi

(1) Si les valeurs de la crue du lac et de la différence de débit entre les affluents et l'émissaire ne sont pas les mêmes dans ce tableau que dans celui de la page 500, cela tient à ce que, dans ce dernier, j'ai fait les calculs d'une moyenne mensuelle à l'autre, par conséquent pour des périodes qui comprennent la moitié d'un mois et la moitié du mois suivant, tandis que, dans le tableau que je donne actuellement, ces valeurs sont calculées d'après les hauteurs du lac au commencement et à la fin de chaque mois, c'est-à-dire du premier jour du mois au premier jour du mois suivant.

longtemps que le débit des affluents dépasse celui de l'émissaire; [1] il s'abaisse sitôt que celui-ci devient dominant. Le débit de l'émissaire a des allures analogues à celles de la hauteur du lac, dont il est fonction; si les deux courbes ne sont pas parallèles, c'est que l'une représente des hauteurs d'eau mesurées en mètres, et l'autre des débits mesurés en mètres cubes à la seconde; il n'y a pas d'échelle commune à des valeurs si différentes.



(Fig. 40.) Rapports de la variation annuelle de hauteur du lac avec le débit des affluents et de l'émissaire.

Echelles : 1 mm. = 1.5 cm. de hauteur du lac.
1 mm. = 6 m³ sec. de débit des affluents et de l'émissaire.

Variations cycliques de périodicité irrégulière

Si l'on étudie les tableaux numériques de la limnimétrie du Léman, ou mieux encore les tableaux graphiques de la planche IV p. 512, où les chiffres principaux sont figurés d'une manière frappante à l'œil,

[1] Nous avons cependant un écart à cette règle dans le mois d'août; cela tient à ce que le maximum annuel a lieu dans le courant de ce mois.

on voit qu'à côté des variations accidentelles d'une année à l'autre, qui font succéder un maximum élevé à un maximum bas, ou un minimum bas à un minimum élevé et vice-versa, sans aucune régularité apparente, sans aucune règle, il y a des variations générales de longue périodicité ; il y a des séries d'années où les eaux sont hautes, d'autres où elles sont basses. Cela est apparent pour les maximums de hauteur du lac, pour les minimums, pour les moyennes annuelles ; cela est apparent dans toute la limnimétrie. Cette variation périodique irrégulière, de longue périodicité, que j'appellerai variation cyclique, est intéressante ; elle se lie au problème des variations du climat, si magistralement exposé et élucidé, il y a quelques années, par notre collègue et ami M. le professeur Ed. Brückner, à Berne ; (¹) elle mérite de nous occuper attentivement.

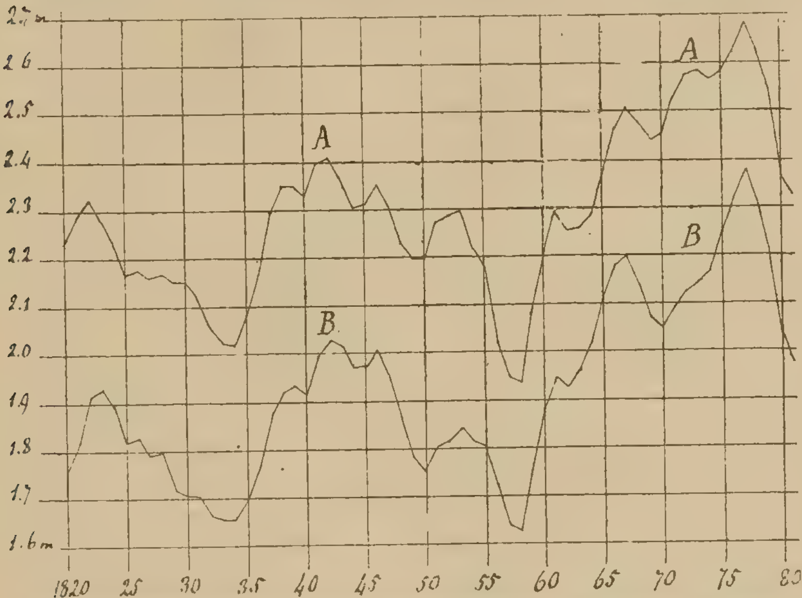
Pour mettre en évidence cet ordre de variation, j'ai utilisé le système de compensation que j'ai déjà indiqué page 299, note 4 ; je prends les moyennes ternaires d'ordre de plus en plus compliqué et j'en tire des séries de chiffres où les variations isolées disparaissent de plus en plus pour ne laisser apparaître que les variations générales. Sur mon tableau de la planche IV, j'ai figuré par des courbes fortement tracées, les moyennes ternaires secondes des maximums, moyennes et minimums de la limnimétrie du Léman.

Ces trois courbes sont, sinon parallèles, du moins assez analogues dans leurs allures pour que je puisse à peu près indifféremment choisir l'une ou l'autre ; les moyennes annuelles, les maximums et les minimums se relèvent ensemble et s'affaissent ensemble. Pour la plus grande commodité, et pour la meilleure utilisation des faits, je préfère m'adresser à la courbe des maximums. En effet, pour le Léman, les valeurs des minimums sont peut-être trop influencées par les manœuvres des barrages de Genève ; elles sont, parmi les valeurs à notre disposition, celles qui sont le plus artificielles. Les valeurs des moyennes annuelles sont grandement modifiées par les basses eaux de l'hiver, par conséquent elles dépendent, pour une notable partie, de ce qu'il y a d'artificiel dans le régime du Léman. Les maximums sont ce qu'il y a de plus indépendant de l'action humaine, et de plus uniquement régi par les faits naturels.

Je me suis cependant demandé si je ne trouverais pas mieux que la

(¹) *E. Brückner*. Klima-Schwankungen. Wien 1890.

courbe des maximums, pour étudier les variations générales que nous avons en vue. Le maximum de hauteur d'une année dépend beaucoup d'un orage accidentel, d'une pluie diluvienne tombant ou ne tombant pas sur le bassin d'alimentation pendant l'époque des hautes eaux. Ne vaudrait-il pas mieux prendre des valeurs embrassant la saison toute entière des eaux estivales? Les irrégularités accidentelles s'y feraient moins sentir. — Pour étudier cette question, j'ai pris, de 1818 à 1883, les hauteurs moyennes du lac pendant les quatre mois d'été de chaque année : juin, juillet, août et septembre; de ces valeurs, j'ai tiré la courbe compensée des moyennes ternaires secondes et je l'ai tracée en *B*, sur la fig. 41. Sur cette même figure j'ai tracé, à la même échelle, la courbe *A*, qui donne la courbe, compensée de la même manière, des maximums annuels du lac ; les différences d'allures sont insignifiantes ; une courbe peut me servir aussi bien que l'autre.[1] Je



(Fig. 41.) Courbes compensées (moyennes ternaires secondes) des maximums de hauteur du lac (A) et des quatre mois d'été de juin à septembre (B) pour les années 1818-1883. 1 mm. = 1.5 cm. de hauteur du lac.

[1] Le travail assez fastidieux qui est résumé dans cette figure était nécessaire; il prouve la légitimité, dans des recherches analogues, de l'utilisation de la courbe des maximums pour l'appréciation des hautes eaux d'un lac. Je le dédie avec grand plaisir à mon ami Brückner, qui y trouvera la justification des études importantes qu'il a faites sur les maximums de hauteur des lacs.

n'hésite donc point à utiliser pour l'étude en question la courbe des maximums qui, sur le Léman, est plus étendue que tout autre. Elle a de plus l'avantage de trouver des analogues dans d'autres lacs, où la hauteur des maximums est souvent observée depuis longtemps.

En étudiant ma planche IV, et spécialement la courbe compensée des maximums annuels de hauteur du lac, j'y reconnais une variation générale, irrégulière, de longue périodicité, une variation cyclique ; je constate les maximums et les minimums principaux suivants :

	Maximums.	Minimums.	Durée entre deux maximums.	Durée entre deux minimums.
1er maximum	1792			
1er minimum		1800	15 ans	
2e maximum	1807			13 ans
2e minimum		1813	10 —	
3e maximum	1817			21 —
3e minimum		1834	25 —	
4e maximum	1842			24 —
4e minimum		1858	35 —	
5e maximum	1877			
Durée moyenne			$21\ ^1/_4$ ans	$19\ ^1/_3$ ans.

La durée des 4 périodes qui s'étendent d'un maximum à l'autre varie de 10 à 35 ans ; elle est en moyenne de $21\ ^1/_4$ années. La durée des 3 périodes qui s'étendent d'un mininimum à l'autre varie de 13 à 24 ans ; elle est en moyenne de $19\ ^1/_3$ années. La durée moyenne générale de cette période cyclique est de 20 ans environ.

Il est vrai qu'entre ces maximums et minimums principaux, il y en a de secondaires ; que, sur la courbe, je reconnais des maximums secondaires en 1822, 1839, 1846, 1853, 1861, 1867 et 1873, des minimums secondaires en 1788, 1820, 1840, 1844, 1849, 1862, 1869 et 1874. Si je les fais intervenir, je vois que la durée moyenne des 11 périodes cycliques secondaires entre le maximum de 1792 et celui de 1877 est de 7.7 années, celle des 12 périodes entre le minimum de 1788 et celui de 1882 est de 7.8 années. La durée moyenne de cette période cyclique de 2e ordre est donc 7.7 années environ.

Que cette variation cyclique soit de 20 années, ou de 7.7 années, il n'y a pas moyen de la rattacher, ni au cycle des taches solaires qui

est de 11 $^1/_9$ années, ni au cycle météorologique de Brückner qui est de 35 ans environ.

Mais ce qui est évident, ce qui saute aux yeux quand on étudie ma planche IV, ce sont les rapports incontestables qui existent entre la hauteur des eaux du lac et la valeur des chutes de pluie. Entre les courbes des maximums et des moyennes annuelles de hauteur du lac, j'ai tracé en rouge la courbe des chutes annuelles (1) de la pluie d'après les observations de Genève, (2) 1826-1891. J'en ai tiré de même la courbe compensée par la méthode des moyennes ternaires secondes, et je l'ai tracée par une ligne renforcée. Or ces courbes montrent une variation cyclique remarquablement parallèle à celle des hauteurs du lac ; il n'y a presque pas un maximum secondaire qui ne soit reconnaissable, à la même année, dans les deux courbes compensées. La démonstration est absolument parlante.

On constate, en faisant cette comparaison, que la différence entre les maximums principaux et les maximums secondaires est beaucoup mieux marquée dans la courbe des hauteurs du lac que dans celle des pluies ; j'en conclus que cet ordre de variations cycliques est exagéré dans les variations de la hauteur du lac et que c'est là qu'on peut le mieux l'étudier.

J'en conclus en second lieu que la période cyclique d'une vingtaine d'années, qui nous est donnée par les maximums principaux de la hauteur des eaux du Léman, doit être attribuée également à la périodicité cyclique des chutes d'eau, et que par conséquent cette dernière ne coïncide ni avec le cycle des taches solaires, ni avec le cycle de Brückner.

Il m'en coûte beaucoup de formuler cette conclusion. Personne n'a salué avec plus d'enthousiasme que moi la belle généralisation de Brückner; (3) je me suis promis de m'appliquer à la vérifier dans les faits climatologiques à ma portée. Et voici qu'au premier essai j'arrive

(1) Année météorologique commençant au 1er décembre.

(2) J'aurais voulu prendre les observations du bassin tout entier d'alimentation du Léman, mais nous ne les possédons que depuis 1864, c'est-à-dire pour une période insuffisamment longue. Je me suis du reste assuré par une comparaison convenable que les variations cycliques sont parfaitement parallèles dans les deux séries d'observations pluviométriques. Je prends donc avec confiance la série de Genève, qui embrasse 66 années.

(3) XIe Rapport sur les variations périodiques des glaciers des Alpes. Jahrbuch des S. A. C. XXVI, p. 354.

à des résultats en parfait désaccord avec ceux de mon ami de Berne. C'est un vif désappointement pour moi ; mais j'ai tant de confiance dans les travaux de mon collègue que je ne renonce pas à ses vues, et que j'espère encore être plus heureux dans une autre occasion.

Variations séculaires

Existe-t-il dans la limnimétrie du Léman un ordre plus étendu de variations — appelons-les des variations séculaires — qui indiqueraient une tendance à des modifications systématiques du régime des eaux ? Etudions cette question qui a fait couler tant d'encre dans les discussions, séculaires elles aussi, des riverains du lac, en nous fondant sur les documents que nous possédons.

Pour cela groupons nos valeurs limnimétriques en périodes artificielles de plus en plus prolongées, de 10, de 20, de 40 ans. Nous obtenons les chiffres moyens suivants : j'arrête ce travail à l'année 1883, avant le début des travaux de Genève qui ont bouleversé le régime du lac ; mais comme terme de comparaison intéressante, je donne la moyenne des valeurs des années 1890 et 1891, qui se rapprochent de ce que sera le régime du lac lorsque le règlement définitif des barrages sera entré en vigueur.

A. *Valeurs limnimétriques en groupes de 10 ans.*

	Minimums	Maximums	Variation	Moyennes
	m	m	m	m
Avant 1791	(10) 0.539 (1)	(11) 2.243	(7) 1.695 (1)	—
1791-1800	—	(10) 2.211	—	—
1801-1810	(5) 0.728	(10) 2.181	—	—
1811-1820	(10) 0.670	(10) 2.206	(4) 1.740	(3) 1.180
1821-1830	(10) 0.490	(10) 2.214	(10) 1.724	(10) 1.170
1831-1840	(10) 0.428	(10) 2.168	(10) 1.738	)10) 1.137
1841-1850	(10) 0.797	(10) 2.316	(10) 1.520	(10) 1.381
1851-1860	(10) 0.732	(10) 2.143	(10) 1.411	(10) 1.271
1861-1870	(10) 1.010	(10) 2.377	(10) 1.357	(10) 1.537
1871-1883	(13) 1.080	(13) 2.522	(13) 1.442	(13) 1.630
1890-1891	*(2) 1.149*	*(2) 1.983*	*(2) 0.834*	*(2) 1.541*

(1) Je fais rentrer dans ces chiffres le minimum et la variation de 1791 qui sont isolés et eussent mal figuré comme représentants d'une décade d'années.

B. *Valeurs limnimétriques en groupes de 20 ans.*

	Minimums	Maximums	Variation	Moyennes
	m	m	m	m
Avant 1801	(10) 0.539	(21) 2.228	(7) 1.695	—
1801-1820	(15) 0.689	(20) 2.194	(4) 1.740	(3) 1.180
1821-1840	(20) 0.459	(20) 2.191	(20) 1.730	(20) 1.154
1841-1860	(20) 0.764	(20) 2.229	(20) 1.465	(20) 1.326
1861-1883	(23) 1.049	(23) 2.459	(23) 1.405	(23) 1.590
1890-1891	*(2) 1.149*	*(2) 1.983*	*(2) 0.834*	*(2) 1.541*

C. *Valeurs limnimétriques en groupes de plus de 40 ans.*

	Minimums	Maximums	Variation	Moyennes
	m	m	m	m
Avant 1840	(45) 0.554	(61) 2.204	(31) 1.723	(23) 1.157
1840-1883	(43) 0.917	(43) 2.352	(43) 1.433	(43) 1.467
1890-1891	*(2) 1.149*	*(2) 1.983*	*(2) 0.834*	*(2) 1.541*

D. *Valeurs limnimétriques moyennes générales.*

	Minimums	Maximums	Variation	Moyennes
	m	m	m	m
1775 à 1883	(88) 0.731	(104) 2,265	(74) 1.554	(66) 1.359
1890-1891	*(2) 1.149*	*(2) 1.983*	*(2) 0.834*	*(2) 1.541*

Avant d'analyser ces tableaux et d'en tirer des conclusions, répétons ce que nous avons dit du degré d'approximation des chiffres qui y sont inscrits. J'estime que notre limnimétrie est parfaitement exacte dans les derniers temps, disons depuis 1870; que de 1840 à 1870 l'erreur probable est de 1 ou 2^cm^ en plus ou en moins, je ne sais pas dans quel sens; qu'avant 1840, l'erreur possible est plus grave et s'élève peut-être à 5 ou 6^cm^; certaines comparaisons semblent indiquer que l'erreur est sous le signe négatif, c'est-à-dire que les cotes données et les moyennes seraient trop basses. Si les variations que nous allons constater dépassent ces valeurs, elles sont dues à une variation d'ordre séculaire.

Les groupements des valeurs limnimétriques en séries de 10 et de 20 ans subissent les inégalités des variations d'ordre cyclique que nous avons étudiées dans le paragraphe précédent. Nous avons vu que les

variations principales de cet ordre avaient une durée moyenne de 20 ans environ, les variations secondaires une durée de 7 à 8 ans ; il n'y a donc rien d'étonnant à ce que leurs effets se fassent sentir dans mes tableaux *A* et *B* qui séparent la période en suites d'années de durée égale ou peu supérieure à celle de ces cycles. Dans l'un et l'autre tableau, les variations séculaires sont indiquées, mais elles sont altérées par des variations d'ordre plus court ; on voit, par exemple, les minimums de 1820 à 1840 être bien inférieurs à ceux des suites précédentes d'années. Mais dans le tableau *C*, qui divise notre période limnimétrique en deux moitiés, l'une avant, l'autre après 1840, toutes ces irrégularités et inégalités accidentelles disparaissent, et il nous reste seulement deux chiffres qui nous montrent nettement le sens des variations séculaires.

Les minimums se relèvent considérablement à mesure que l'on avance dans la période limnimétrique ; les basses eaux sont de plus en plus hautes. Avant 1840, leur valeur moyenne est ZL + 0.55^{m}, après 1840, elle est 0.92^{m}, différence 37^{cm}. Ce fait est encore plus apparent si nous considérons des groupements plus courts d'années. Tandis qu'avant 1840 les eaux d'hiver restaient entre 0.40, 0.50 et 0.60^{m} de notre échelle, elles s'élèvent à 1.05^{m} de 1861 à 1883, à 1.08^{m} de 1871 à 1883.

Si à côté des moyennes nous étudions, soit sur les tableaux numériques, soit sur le tableau graphique, les valeurs extrêmes des minimums, nous voyons ce fait général bien constaté. Les minimums étaient plus bas dans la première moitié de notre période que dans la seconde. C'est ainsi que nous avons avant 1840 les minimums les plus bas

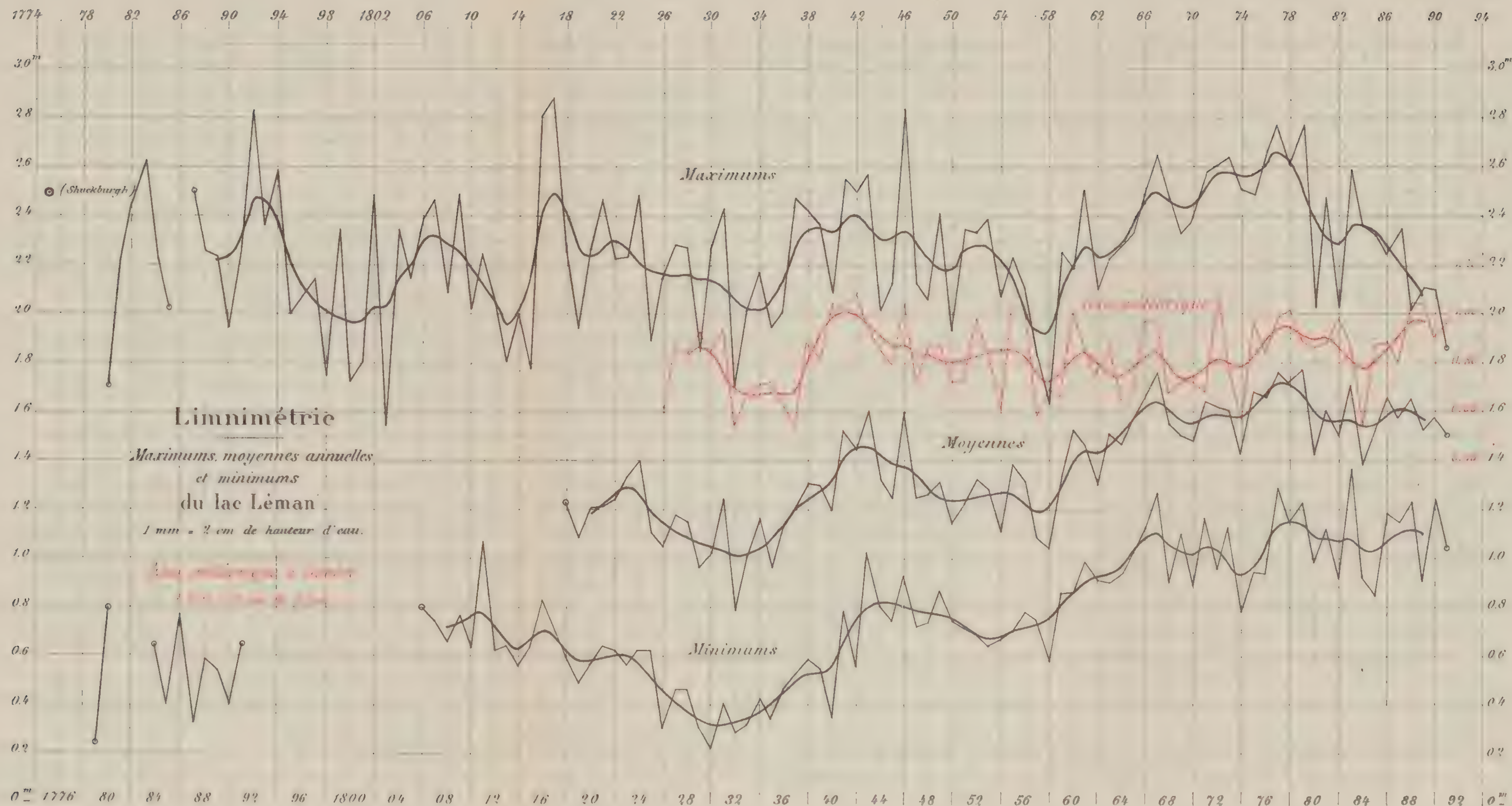
vers 1700	carrières de Fraidaigues, etc.	ZL — 0.3 ^{m}
1779	zéro Mestrezat	+ 0.24
1826	observation limnimétrique	+ 0.31
1829	id.	+ 0.31
1830	id.	+ 0.22
1833	id.	+ 0.32

tandis qu'après 1840 les minimums les plus bas sont descendus

en 1842 à	ZL + 0.57^{m}
1858	+ 0.59

et après 1860

en 1874	ZL + 0.80



F.A.Forel. Le Léman. Pl. IV. Lausanne, 1892

Lith. J. Chappuis, Lausanne

C'est ainsi que les minimums les plus élevés, ceux qui ont dépassé la cote 1.0m étaient autrefois très rares : avant 1864, nous n'en trouvons que deux, en 1811 et en 1843, tandis que de 1865 à 1883 nous en avons 11 exemples.

Je suis donc fondé à dire que les basses eaux, les minimums, se sont sensiblement relevés dans la fin de la période limnimétrique du Léman.

Les maximums ont subi, eux aussi, une variation qui les a relevés dans les années modernes, mais cette variation est moins forte que pour les minimums. Le chiffre moyen des maximums avant 1840 est 2.20m, après 1840, 2.35m; la différence n'est que de 15cm. Cependant notre dernière suite décennale, de 1870 à 1883, nous donne une moyenne notablement plus élevée, 2.52m; quelle est dans ce dernier chiffre la part que nous devons attribuer à une variation cyclique? cela est difficile à dire.

Les cotes isolées des maximums les plus élevés confirment assez bien cette variation. En effet, si nous ordonnons les maximums des années d'inondation, en descendant depuis les plus désastreux, nous avons:

Maximum de 1817	par ZL + 2.880m
1846	2.834
1792	2.832
1816	2.807
1879	2.788
1877	2.761
1876	2.661
1867	2.643
1873	2.640
1878	2.612
1872	2.607, etc.

Nous avons, dans les cent dernières années, 3 années d'inondation avant 1840, 8 depuis 1840. (1)

(1) Les documents historiques du siècle dernier nous parlent d'inondations ou de très hautes eaux aux dates suivantes :

1680 Rapport du trésorier romand de Berne, 18 août 1739.
1720 Rapport de C. Steiger, bailli de Bonmont, 7 janvier 1721 ;
1737 Pétitions des communes vaudoises ;
1739 Rapport de la Chambre des comptes de la Ville et république de Genève, 27 novembre 1739 ;
1747 Rapports de May et de Rovéréaz, 1748 ;

Ce qui a beaucoup influé sur les moyennes, c'est que les maximums élevés, qui étaient l'exception dans la première moitié de la période, sont devenus la règle dans la seconde. De 1840 à 1880, il n'y a qu'une seule série de maximums bas, vers 1858, tandis qu'auparavant c'étaient les séries à maximums élevés qui étaient l'exception. C'est ainsi que le nombre des maximums bas est plus élevé dans la première moitié de la période, le nombre des maximums hauts dans la seconde moitié; ainsi que l'indique la groupement suivant :

Maximums	avant 1840	après 1840
au-dessous de 2.0m	13	3
de 2.0 à 2.4m	32	20
au-dessus de 2.4m	15	20

Ce fait devient très évident dans notre planche IV, si l'on y étudie la courbe compensée des maximums. On y voit la grande relevée que subit cette courbe de 1858 à 1880.

Pour les maximums, ma conclusion sera donc qu'il y a tendance à les voir se relever dans les années modernes ; tout au moins tendance à une fréquence plus grande des maximums élevés.

Amplitude de la variation annuelle. La différence entre le maximum et le minimum annuel, autrefois très forte, tend à diminuer dans le cours du siècle. Avant 1840 elle était en moyenne de 1.72m, après 1840 elle descend à 1.43m; différence 29cm. Cette variation est la conséquence forcée de celle que nous avons constatée chez les minimums. A mesure que les basses eaux de l'hiver se sont relevées, sans que les maximums de l'été aient subi un relèvement aussi considérable, la différence entre les deux valeurs s'est atténuée.

Moyennes annuelles. Elles se sont progressivement relevées. Cela est déjà évident dans notre tableau *B* des moyennes vingtennaires ; cela est établi par notre tableau *C* où nous trouvons

avant	1840	moyennes annuelles	1.157m
après	1840	—	1.467
		différence	0.310m

Ce relèvement tient en majeure partie au relèvement des basses eaux qui entrent pour la moitié dans les moyennes annuelles, en faible

1749 et 1752 Observations de Maritz ;
1782 Réclamations et pétitions des communes vaudoises.
Mais, en l'absence d'observations repérables, il nous est impossible de comparer ces crues du lac avec celles de notre période limnimétrique.

partie au relèvement des hautes eaux; cela n'a pas besoin de démonstration.

Durée des hautes eaux. Si la hauteur des maximums n'a pas considérablement changé dans le cours du siècle de nos observations limnimétriques, il est en revanche une valeur qui s'est successivement accrue, c'est la durée des hautes eaux. Dans le début de notre ère limnimétrique, la crue du lac commençait plus tard, finissait plus tôt, et le nombre des jours à cotes élevées était moins grand que dans les vingt dernières années. C'est ce que je montrerai par quelques chiffres.

J'ai compté pour deux périodes, l'une la plus ancienne de notre limnimétrie de 1817 à 1839,[1] l'autre la plus récente de 1871 à 1883, le nombre de jours pendant lesquels les eaux étaient au-dessus de la cote ZL + 1.3^{m}, hauteur qui était considérée comme la limite supérieure des basses eaux; c'était la cote à laquelle on enlevait le barrage mobile du Rhône de Genève. Etonné de l'écart énorme qu'il y avait entre les deux séries de chiffres, j'ai répété le compte pour les cotes 1.5^{m} et 2.0^{m}, et je suis arrivé à des résultats analogues.

	Le lac a été en moyenne au-dessus de la cote		
	1.3^{m}	1.5^{m}	2.0^{m}
1817-1839	133 jours	109 jours	45 jours
1871-1883	270 —	196 —	80 —
Différence	137 jours	87 jours	35 jours

La durée des hautes eaux a presque doublé d'une période à l'autre.

Pour la période 1817-39, j'ai compté sur les registres du limnimètre Nicod-Delom, à Vevey, les jours où les eaux étaient au-dessus des cotes 125, 116 et 96 pouces de Berne, ce qui, dans notre coordination, correspond aux cotes ZL + 1.287^{m}, 1.506^{m} et 1.994^{m}. Comme il y a une certaine incertitude dans l'équation de ce limnimètre, j'ai voulu me rendre compte de l'effet qu'aurait donné pour la durée des hautes eaux une erreur de 5^{cm} qui est, à ce que je crois, le maximum de l'erreur probable. En prenant le nombre des jours dépassant les cotes 127, 118 et 98 pouces de Berne, en fixant par conséquent la limite des hautes eaux à un niveau de 49^{mm} plus bas, cela ne m'a donné un allongement de la phase des hautes eaux que de 5, 4 et 6 jours. La dif-

[1] Pour l'année 1826, nous n'avons que des observations insuffisantes: cette année a donc été sortie de compte.

férence considérable qui existe pour la durée des hautes eaux, entre les deux périodes en question, ne provient donc pas d'une erreur dans la coordination des observations ; elle est bien réelle ; la durée des hautes eaux a été prolongée dans les derniers temps du régime semi-naturel du Léman.

Degrés limnimétriques. Je donnerai encore par un autre procédé une idée de l'ordre de variations qui nous occupent ici. Quand je veux caractériser numériquement les allures limnimétriques d'une année, je compte le nombre de jours pendant lesquels le lac s'est tenu à un degré déterminé, degrés que j'ai établis pour le Léman aux cotes suivantes :

très hautes eaux	de 2.5m	à 3.0m
hautes eaux	2.0	2.5
eaux moyennes	1.5	2.0
basses eaux	1.0	1.5
très basses eaux	0.5	1.0

Je puis faire le même compte pour des séries d'années. Si donc je sépare en deux séries, la période limnimétrique de l'ancien régime, pour laquelle nous avons des observations détaillées de 1818 à 1840 et de 1841 à 1883, j'ai les chiffres suivants, qui indiquent le nombre de jours auxquels en moyenne le lac s'est tenu aux différents degrés de hauteur :

	1818-1840	1841-1883	différence
hautes eaux	9 jours	62 jours	+ 53 jours
eaux moyennes	95	71	— 24
basses eaux	84	232	+ 148
très basses eaux	177	—	— 177

Dans la seconde moitié de la période le lac s'est tenu plus longtemps dans les hautes et les basses eaux, moins longtemps dans les eaux moyennes et les très basses eaux ; ou, en somme, plus longtemps dans les eaux plus élevées, moins longtemps dans les eaux moins élevées.

En résumé, les variations séculaires que nous pouvons constater dans le régime limnimétrique du Léman, depuis 100 ou 150 ans que des mesures plus ou moins précises nous permettent de l'étudier, sont, dans la seconde moitié de la période : Relèvement très grand des minimums de hauteur, relèvement assez grand des moyennes annuelles, diminution assez grande de l'amplitude de la variation annuelle, relèvement faible des maximums, caractérisé surtout par une plus grande

fréquence des maximums élevés, enfin prolongation considérable de la durée des hautes eaux.

Avant de rechercher les causes de ces variations séculaires, nous devons nous poser une question préjudicielle. Sont-elles des variations périodiques ou des variations systématiques? Sont-elles périodiques à longue échéance et les valeurs reviendront-elles, au bout d'un certain temps, d'un temps très long, à leurs cotes primitives? ou bien sont-elles systématiques, c'est-à-dire que la variation continuerait à modifier les valeurs limnimétriques dans le même sens, pour aussi longtemps que la cause modificatrice serait efficace? A cette question, la réponse expérimentale ne nous sera pas donnée. En effet, la régularisation du Rhône par les nouveaux barrages de Genève ayant mis fin à ce qu'il restait de naturel au régime du Léman, nous ne reverrons plus ni périodes de très basses eaux, ni périodes d'inondation, nous l'espérons du moins. Quant à la réponse théorique, elle dépend de la cause à laquelle on doit attribuer ces variations séculaires. Sans vouloir réveiller ici les débats du procès du Léman, je me bornerai à indiquer les faits qui me paraissent démontrés ou probables.

Le relèvement progressif des basses eaux est dû évidemment à la fermeture toujours plus parfaite des barrages mobiles de Genève. A mesure que l'on avait besoin d'une chute plus forte pour faire agir des machines hydrauliques de plus en plus puissantes, à mesure que l'on sentait le besoin d'une meilleure utilisation de l'eau accumulée dans le lac pour n'être pas pris au dépourvu à la fin d'un hiver trop sec, on a perfectionné l'occlusion de l'émissaire dès le début de la saison froide, et les basses eaux ont été relevées.

Une conséquence immédiate et nécessaire du relèvement des basses eaux et des minimums du lac a été le relèvement des moyennes, et la diminution d'amplitude de la variation annuelle. Nous l'avons déjà suffisamment indiqué.

Une autre conséquence du relèvement des basses eaux a été l'exagération de la crue estivale, ou tout au moins son apparition plus hâtive et la prolongation de sa durée. En effet, au début de la crue, le lac, partant d'un minimum plus élevé, n'avait pas la ressource d'emmagasiner le grand volume d'eau qui s'y logeait, alors que le minimum était très bas. Nous avons vu que, d'une moitié à l'autre de notre période limnimétrique, les minimums se sont relevés de 40^{cm} environ.

Sur la superficie du Léman, une épaisseur de 40^{cm} d'eau représente un volume de 233 millions de ^{m3}. C'est le débit du Rhône aux grandes eaux pendant 5 jours ; c'est donc un allongement de la crue pendant quelques jours, c'est une surélévation probable du maximum de quelques centimètres.

Y a-t-il lieu, pour expliquer les changements constatés dans le régime des maximums du lac, d'invoquer un rétrécissement de l'ouverture de l'émissaire, une insuffisance de son débit pour les hautes eaux. Ce sont là questions d'hydraulique que les experts techniques du Tribunal fédéral auraient peut-être résolues, si le procès du Léman avait été jugé. Elles sont en partie hors de ma compétence, et les appréciations que je pourrais énoncer risqueraient, avec quelque soin que je m'applique à rester purement objectif, d'être suspectées de partialité ou de préjugés, comme celles de tous ceux qui de près ou de loin ont été mêlés à ces débats passionnants. Je préfère m'abstenir et me borne à constater que l'ouverture suffisante du Rhône a donné entière et absolue satisfaction à ceux qui réclamaient un meilleur écoulement de l'émissaire du Léman.

Il est cependant quelques hypothèses émises pour expliquer les hautes eaux du Léman, qui relèvent du naturaliste et sur lesquelles j'ai le devoir d'exprimer une opinion : Il s'agissait de la période des maximums très élevés de 1860 à 1880. Pendant une vingtaine d'années, les eaux estivales ont été remarquablement hautes, et il y a eu en particulier, de 1876 à 1879, quatre années consécutives de véritables inondations à l'époque du maximum d'été. Cette période de hautes eaux est très bien visible sur la courbe compensée des maximums de la planche IV, p. 512.

1re hypothèse. Cette période de grandes eaux doit-elle être attribuée à une phase extraordinairement pluvieuse ? Après avoir vu les rapports évidents existant entre le régime des pluies et celui de la hauteur des eaux du lac, nous devons nous demander si les maximums élevés de 1860-80 ne seraient pas explicables par une abondance inusitée des pluies dans le bassin d'alimentation du Léman ? Je ne le crois pas. Si nous consultons, sur la même planche IV, les courbes rouges qui figurent les valeurs annuelles des pluies de Genève, nous voyons que, dans cette période, il n'y a rien d'extraordinairement anormal dans les chutes d'eau. Ces années ont été en général pluvieuses

soit à Genève, soit dans le bassin du Rhône, soit dans l'ensemble de la Suisse ; mais la valeur des chutes d'eau a été loin d'atteindre l'importance de celles des années 1838 à 1843. Cette démonstration est d'autant plus probante que les deux courbes à comparer, celle des maximums de hauteur du lac et celles des pluies, montrent dans la période de 1860-1880 exactement les mêmes variations secondaires, les maximums de second ordre de 1861, 1867, 1872, 1877, parfaitement synchrones et parfaitement parallèles ; la réaction du lac aux variations de la pluie est excellente. Mais si les maximums secondaires sont également marqués dans les deux courbes, on ne voit pas dans la courbe des pluies le maximum de premier ordre, la grande ascension générale du tracé qui est si bien développée dans la courbe des maximums de hauteur du lac. J'en conclus que ce n'est pas à l'exagération des chutes d'eau météorique que l'on doit attribuer uniquement la période extraordinaire des grandes eaux de 1860 à 1880. Cette affirmation demande à être précisée. Ex nihilo nihil fit; l'eau ne se forme pas spontanément ; la masse énorme d'eau qui entre dans le Léman pour y produire la crue d'été est bien de l'eau météorique, en immense majorité de l'eau des pluies et des neiges de haute montagne. Quand les pluies et les neiges sont plus abondantes, la crue d'été est plus forte. Les fortes crues d'été de la période en question correspondent bien à des années pluvieuses. Cela est incontestable; je l'accorde parfaitement. Ce que je conteste, c'est que l'aggravation générale, prolongée, continue, des hautes eaux pendant cette période de vingt ans soit due uniquement à un excès d'humidité atmosphérique, c'est qu'il y ait eu un relèvement général de la courbe des pluies correspondant au relèvement général de la courbe limnimétrique.

2e hypothèse. Plusieurs auteurs (1) ont attribué les hautes eaux de la période 1860-1880 aux endiguements du Rhône du Valais. Les grands travaux exécutés de 1863 à 1880 par les communes et l'Etat du Valais, appuyés par les subsides de la Confédération, ont régularisé le cours du fleuve et l'ont retenu entre des digues qui l'empêchent de divaguer, comme il le faisait trop souvent autrefois, dans les terrains marécageux de la vallée. Il en résulte que l'eau des crues est amenée plus directement et plus rapidement au lac, que l'effet de ces crues est plus actif

(1) Entr'autres M. Ph. Plantamour. Lettre du 15 juin 1879. Journal de Genève 20 juin.

sur le régime du lac. Cela est juste. De ce fait on doit s'attendre à une plus grande irrégularité dans les allures du Rhône à son entrée dans le Léman; ses crues auront une moins grande durée et par conséquent seront plus accentuées; sur un tracé graphique, les dentelures de ces crues seront plus aiguës et plus élevées. Le même effet doit se produire sur le lac et nous devons reconnaître une probabilité de l'exagération des valeurs des maximums, comme résultante des endiguements du Rhône.

Mais si l'endiguement du Rhône peut amener un plus rapide écoulement des eaux, il ne saurait occasionner une augmentation de leur volume; le même volume d'eau est apporté au Léman quelques heures plus tôt, mais c'est la même quantité. Par conséquent, si à côté d'une surélévation des maximums du lac nous trouvons une surélévation générale des eaux estivales, cette interprétation sera insuffisante. Or c'est ce que nous constatons sur notre tracé B de la figure 41 ([1]). Nous y voyons la moyenne de hauteur des quatre mois d'été suivre pendant la période en question, 1860-1880, la même ascension en hauteur que la courbe des maximums. Il y a donc eu plus grande accumulation d'eau dans le lac et non pas seulement apport plus rapide de la même quantité d'eau. L'hypothèse ne suffit donc pas, à ce que nous croyons, à expliquer les faits.

3e hypothèse. On a attribué les hautes eaux de la période de 1860-1880 au déboisement des montagnes du Valais. Si le Valais avait été réellement déboisé à cette époque, il y aurait eu là effectivement la cause d'un apport plus brusque et plus rapide des eaux de pluie et changement du régime des affluents et par suite modification du régime du Léman. Mais le Valais est-il réellement déboisé? Je laisse la réponse à ceux qui connaissent ce beau canton. Voici du reste quelques notes extraites d'un rapport de M. A. de Torrenté, inspecteur cantonal des forêts du Valais, en date du 2 juin 1881 : « Dans la période des années 1830 et 1840 les exploitations de bois eurent lieu en blanc estoc; il en est résulté des déboisements assez accentués, notamment dans les vallées de la Saltine et d'Anniviers. Mais en 1850, la loi forestière entra en vigueur; elle a immédiatement fait cesser les coupes blanches... depuis environ trente ans, il ne peut plus être question de déboisement. Les forêts dénudées antérieurement sont maintenant

([1]) Page 507.

en grande partie reboisées, soit naturellement, soit artificiellement. Les incendies de forêts ont aussi exercé des ravages sur le flanc de nos montagnes ; les dégâts les plus considérables ont eu lieu au-dessus de Varonne et de Rarogne; mais ces parties dénudées ne fournissent pas une goutte d'eau au Rhône, même par les plus fortes pluies. Du reste, même dans ces terrains ingrats, le reboisement s'opère avec assez de succès. » M. de Torrenté montre ensuite que les plus fortes inondations du Rhône sont dues à la fonte violente des neiges et des glaciers par le föhn; c'est ainsi que l'inondation de 1860 a été due à la fonte des neiges de la vallée de Conches et de la vallée de Binn, celle de 1868 à la fonte des neiges et à une trombe d'eau dans les vallées de Saas et de St-Nicolas. Ces vallées sont les vallées les mieux boisées du Valais.

Le domaine forestier du Valais représente le 12 % du territoire du canton, par conséquent une superficie d'environ 630^{km^2}.[1]

4e hypothèse. Une autre explication de la hauteur extraordinaire du Léman de 1860 à 1880 a été proposée par M. H. de Saussure;[2] elle est fort spécieuse et mérite d'être considérée attentivement. M. de Saussure cherche à rendre compte du changement constaté dans le régime du lac de 1806 ou 1820 à 1860 d'une part, et de 1860 à 1880 d'autre part, et il l'attribue aux variations des glaciers du Valais. De 1820 à 1860, dit-il, les glaciers ont été en crue, ils ont emmagasiné de l'eau sous la forme de glace; ils ont plus accumulé de neige que la fonte annuelle n'en a détruit; l'eau envoyée au Léman a dû être, de ce fait, réduite. De 1860 à 1877 les glaciers ont été en décrue; ils ont plus livré d'eau qu'ils n'en ont reçu de l'atmosphère; leurs affluents doivent avoir été augmentés d'autant. Les hautes eaux du Léman de 1860 à 1880 seraient donc causées essentiellement par une fonte extraordinaire des glaciers du Valais.

Il y aurait bien des objections de détail à opposer à cette théorie. Je pourrais montrer qu'à un état d'avancement extrême des glaciers ne correspond pas toujours un état de basses eaux du lac; qu'au contraire, pendant les années 1816 et 1817, où le lac a été exceptionnellement haut, tous les glaciers du Valais, si l'on en croit les rapports de l'époque, étaient en état d'allongement extraordinaire.

(1) *Berlepsch.* Schweizerkunde, p. 493. Braunschweig, 1875.
(2) La Question du lac, p. 30 sq. Genève 1880.

Je pourrais montrer qu'il n'y a pas parallélisme évident entre les allures inverses des glaciers et celles du lac. Tandis que les glaciers du Valais ont généralement commencé à décroître vers 1855 ou 1856, le lac a montré encore une période de très basses eaux en 1857 et 1858. La décrue des glaciers a tout d'abord été très forte, les glaciers fondant rapidement sur place. Les eaux du Léman, au contraire, se sont bien relevées dès 1859, mais elles n'ont atteint des hauteurs désastreuses qu'à partir de 1876. La décrue de la plupart des glaciers s'est continuée jusque bien avant dans la décade de 1880 à 1890; seul le glacier du Schallhorn est signalé comme ayant commencé à croître en 1878, ceux du Trient et de Zigiorenove en 1879 et cependant dès 1880 les maximums du lac se sont abaissés et ont cessé d'être des eaux d'inondation. Je prouverais ainsi historiquement qu'il n'y a aucune relation entre les crues du lac et la décrue des glaciers. Mais je préfère prendre la question de plus haut, et essayer de réfuter l'hypothèse de mon ami de Saussure, en exposant la théorie probable des variations des glaciers. Aussi bien, c'est l'énoncé de l'idée très ingénieuse du physicien de Genthod qui m'a entraîné, pour comprendre les choses du lac, à me plonger dans l'étude des glaciers et à la reprendre *ab ovo*. (1)

Les glaciers sont formés par la neige tombée sur les talus des hauts vallons des Alpes. Masse plastique, ils s'écoulent lentement dans le fond des vallées et tendent à descendre indéfiniment en suivant la ligne de plus grande pente. Masse fusible, ils sont attaqués par la chaleur des régions basses, et se transforment en eau qui est drainée par le torrent glaciaire. L'action opposée de ces deux facteurs, écoulement de la masse semi-fluide qui fait allonger le glacier, et fusion de la glace qui le fait raccourcir, détermine l'arrêt du front du glacier en un point variable de son vallon alpin; si l'écoulement est plus actif que la fusion estivale, le glacier descend plus bas dans la vallée, s'il l'est moins, le glacier diminue de longueur, se raccourcit; son front recule. Quelle est l'action dominante, quelle est celle qui a l'effet majeur dans les variations glaciaires? Nous le reconnaîtrons en étudiant les allures du phénomène.

(1) Voir mes rapports annuels sur les Variations périodiques des glaciers des Alpes, dans l'Echo des Alpes 1881 et 1882, et dans le Jahrbuch des schw. Alpenclubs 1883 et années suivantes. — Voir aussi mes Essais sur les variations des glaciers, Archives de Genève VI, 5 et 448, 1881.

Est-ce la fusion annuelle, l'ablation de l'extrémité terminale du glacier, comme le veulent L. Gruner,(1) A. Favre,(2) M. H. de Saussure, pour ne citer que les auteurs modernes? Si cela était, nous devrions constater, l'ablation étant plus forte dans un été chaud, plus faible dans un été froid, un raccourcissement du glacier dans le premier cas, un allongement dans le second. Il en résulterait que les variations du glacier seraient de très courte périodicité et très irrégulières. A un été chaud succède parfois un été froid; au milieu d'une série d'étés chauds arrive parfois un été froid et vice-versa; la plus grande irrégularité existe dans la distribution de ces variations thermiques d'une année à l'autre. Voyons-nous les glaciers se raccourcir chaque fois que l'été est plus chaud que la normale, s'allonger chaque fois que la température estivale est plus basse? Les variations des glaciers suivent-elles les variations actuelles de la température atmosphérique? En aucune façon. Il n'y a nul rapport apparent entre ces deux valeurs.

Le glacier du Rhône est en décrue depuis 1856, décrue continuelle, sans interruption ni retour en avant; chaque année son front a reculé.(3) Et cependant dans ces 35 années il y a eu des étés plus froids que la normale, les étés de 1857, 1858, 1860, 1864, 1866, 1869, 1871, 1872, etc.; (4) tous les étés n'ont pas été trop chauds, l'ablation n'a pas été constamment dominante. Pendant que le glacier du Rhône, le Gorner, Arolla, Otemma, etc., étaient ainsi en décrue continue, nous avons vu d'autres glaciers, celui des Bossons depuis 1875, ceux du Trient et de Zigiorenove depuis 1879, se mettre en crue et subir un allongement continu, sans interruption, sans retour en arrière. (5) Est-ce que l'ablation aurait pu être de beaucoup et constamment la plus forte dans quelques glaciers, de beaucoup et constamment la plus faible dans quelques autres? Est-ce que le facteur chaleur, qui détermine principalement la valeur de l'ablation, a pu être sans interruption au-dessus de la normale dans quelques vallées, et sans interruption au-dessous de

(1) *L. Gruner.* Sur les causes qui ont amené le retrait des glaciers dans les Alpes. Comptes-rendus Acad. sc. de Paris, LXXII, 632, 1871.

(2) *A. Favre.* Description géologique du canton de Genève, I, 105, Genève 1880.

(3) Sauf peut-être dans quelques mois pendant les dernières années, où le glacier arrivant à la fin de sa phase de décrue est dans cet état d'équilibre que nous désignons par le mot de stationnaire.

(4) D'après les observations de Genève.

(5) La température des trois mois d'été a été plus élevée que la normale dans les années 1876, 1877, 1879, 1881, 1885, 1886, 1887 (observations de Genève).

la normale dans d'autres vallées voisines pendant d'aussi longues séries d'années? Ce n'est pas admissible. Et ce qui est encore plus décisif, ce sont les allures opposées de deux glaciers situés dans le même vallon: par exemple le glacier d'Arolla et celui de Zigiorenove dont les fronts aboutissent dans la vallée de la Borgne à moins de 2km de distance; de 1879 à 1891, pendant que le premier a continué à se raccourcir, le second s'est mis en crue rapide et s'est constamment allongé. Les actions thermiques qui président à l'ablation ont été incontestablement les mêmes sur les deux glaciers; donc ce ne sont pas ces actions thermiques qui occasionnent les variations des glaciers. La valeur de l'ablation n'est pas l'action dominante pour les crues et décrues des glaciers.

C'est la vitesse d'écoulement qui est le grand facteur des variations de volume du glacier. Le débit du glacier varie. Pendant une série d'années, la vitesse d'écoulement est considérable; elle remplace par un puissant apport de glace au front du glacier la longueur détruite par l'ablation de l'été, elle la dépasse en valeur, et l'extrémité terminale est repoussée en avant; le glacier s'allonge, il a sa phase de crue. Pendant une série d'années, l'écoulement du glacier est faible; sa vitesse devient nulle au front du glacier, qui représente alors un bloc de glace immobile; il fond sur place et se raccourcit; le glacier est en décrue. Toutes les observations faites sur les glaciers, et en particulier celles du glacier du Rhône, étudié sur un si grand pied par le Club alpin suisse, (1) prouvent que la vitesse d'écoulement varie dans des proportions considérables à l'extrémité terminale des glaciers; en temps de décrue, elle tombe à 6, 4 ou 2m par an; en temps de crue, elle dépasse 40, 60, 80m par an. Ces allures différentes se continuent pendant de longues périodes d'années; c'est par 10 ans, 20, 40 ans, que se mesure la phase de petite vitesse du glacier; c'est un nombre d'années aussi grand que dure la phase de grande vitesse. La longueur considérable de cette périodicité nous fait voir que sa cause doit être distante; le phénomène qui la produit doit pouvoir s'accumuler, il doit être la résultante de faits variables. Ce n'est pas une cause actuelle, immédiate, proche voisine, dont les irrégularités accidentelles apparaîtraient dans des inégalités d'une année à l'autre; c'est une cause éloignée qui, par une intégration des variations

(1) *F.-A. Forel.* Les travaux du Club alpin suisse au glacier du Rhône. Echo des Alpes XIX, 26, Genève, 1883.

temporaires, arrive à produire un effet tantôt beaucoup plus grand, tantôt beaucoup plus faible que la moyenne.

Quelle est la cause de ces variations à longues allures de la vitesse d'écoulement des glaciers? Nous les attribuons à des variations dans l'épaisseur du névé. Par suite d'accumulation de neige dans les années humides, le névé s'accroît en épaisseur; la somme des couches de neige tombée dans la saison froide et non fondue dans la saison chaude, s'additionne d'une année à l'autre; si cette somme algébrique dépasse la moyenne, le névé devient plus fort, plus profond, plus large; la source d'alimentation du glacier est augmentée, et l'écoulement du fleuve glacé arrive au degré de la grande vitesse. Au contraire, que des années sèches se succèdent, que la somme algébrique des chutes de neige des années précédentes fasse un total inférieur à la normale, la poussée de ce névé peu épais est trop faible pour chasser le glacier à grande vitesse; son écoulement se ralentit, sa vitesse au front du glacier devient nulle. Nous n'avons pas à étudier ici le mécanisme de ces variations d'épaisseur du névé et de leur réaction sur la longueur du glacier; cela nous entraînerait trop loin de notre lac. Qu'il nous suffise de constater qu'il semble aujourd'hui bien établi que les variations périodiques des glaciers ont pour cause principale, essentielle, non pas des variations dans la valeur de l'ablation, mais des variations dans la vitesse d'écoulement.

Revenons à l'action possible des variations glaciaires sur le débit des torrents alpins, et par conséquent sur la hauteur du lac. Je tirerai de la dissertation ci-dessus développée une conclusion précise. Puisque la phase de décrue des glaciers est due au ralentissement de l'écoulement du glacier et non à une fonte excessive de l'extrémité terminale, la phase de décrue ne doit pas être cause d'une exagération du débit des torrents glaciaires. En particulier la période de hautes eaux du Léman de 1860 à 1880, n'a pas été causée par la grande phase de décrue des glaciers de la fin du XIX[e] siècle.

Mais j'ajouterai que nous devons reconnaître la possibilité de relations entre la hauteur des eaux des lacs et les variations glaciaires. Quand, par suite d'une exagération de la vitesse d'écoulement, les glaciers ont été poussés à une longueur excessive, qu'ils sont en état de maximum et qu'ils descendent très bas dans les vallées, leur partie terminale arrive dans des altitudes relativement peu élevées où la chaleur estivale, toutes choses égales d'ailleurs, doit avoir une action destructive

plus forte; les torrents glaciaires doivent alors être d'un plus grand débit et les eaux des lacs plus élevées. Quand, au contraire, les glaciers, mal alimentés par des névés réduits en épaisseur se sont raccourcis et que leur front s'est retiré dans le haut des vallons alpestres, ils sont dans une région où la chaleur est moins forte, où l'été est moins long; quand les glaciers sont à leur minimum, le débit des torrents glaciaires doit être réduit et de ce fait les eaux des lacs doivent être peu hautes.

Si ce facteur était seul agissant, nous devrions donc trouver une coïncidence entre les fortes crues estivales des lacs et les périodes de grand allongement général des glaciers, entre les faibles crues des lacs et les périodes de grande retraite des glaciers. Avons-nous quelque chose dans cette direction? Tout en tenant compte des irrégularités extrêmes dans les allures des glaciers, qui très rarement sont simultanément en crue ou en décrue, je crois pouvoir caractériser comme suit les variations glaciaires du Valais dans le siècle présent :

Vers 1818 et 1820, époque de maximum très générale; c'est la date du plus grand maximum historique de plusieurs glaciers. Les documents de l'époque racontent qu'alors tous les glaciers étaient ou à leur maximum, ou tout au moins en crue.

Vers 1830 et 1840, époque de raccourcissement des glaciers, mal indiquée, mal généralisée; diminution de longueur peu considérable.

Vers 1850 ou 1855, époque très générale de maximum; les glaciers se sont moins allongés qu'en 1818, mais cependant l'état de maximum est dans l'ensemble bien caractérisé.

De 1855 à 1875 et à nos jours, phase de décrue générale qui s'est manifestée successivement sur tous les glaciers. L'état de minimum, qui pour beaucoup de glaciers a été poussé à l'extrême, a été atteint par les uns dès 1875, 1880, 1890; un grand nombre sont encore en décrue actuellement.

A partir de 1875 et 1880, quelques glaciers ont commencé à se mettre en crue, spécialement dans le massif du Mont-Blanc, mais aucun d'eux n'a encore, en 1891, atteint son maximum de longueur; la moitié au moins des glaciers du Valais sont encore en état de décrue ou de minimum. (1)

(1) Des glaciers du bassin d'alimentation du Léman, nous connaissons comme étant, en 1891, en phase de crue, les suivants :

Vallée de Fiesch. Glacier de Fiesch (depuis 1885).

Il n'y a rien dans ces allures de glaciers qui nous montre aucune analogie avec celles de la limnimétrie du Léman, telle que nous l'avons donnée numériquement et graphiquement. Les hautes eaux du lac sont donc régies par des facteurs autres et plus puissants que ne le sont les variations des torrents alpins provenant de la plus ou moins grande longueur des glaciers.

VARIATIONS ACCIDENTELLES

Jusqu'à présent nous n'avons décrit dans la limnimétrie du Léman que des moyennes mensuelles et annuelles, qui nous ont servi à étudier les allures générales ou normales des variations; nous n'avons pas indiqué les allures réelles des variations de hauteur du lac. Chaque jour la hauteur des eaux dépend d'une foule de facteurs actuels ou antérieurs ; leur résultante produit une action de crue ou de décrue, qui s'exprime par la hauteur effective du lac. Ces facteurs sont entr'autres :

a La hauteur du lac trop élevée ou trop basse pour la saison. Si les circonstances antérieures ont trop élevé le niveau du lac, le débit de l'émissaire dépassera probablement le débit des affluents, quelque gonflés qu'ils puissent être par les circonstances présentes, et les eaux tendront à baisser, et vice versa.

b L'accumulation des neiges dans la saison précédente, sur la région qui est actuellement au-dessous de l'isotherme zéro, si elle est considérable et couvre une vaste surface, tendra à enfler les affluents, et à faire monter le lac ; et vice versa.

c Une température élevée qui fait fondre les neiges, tend à faire monter le lac, et vice versa.

Vallée de Saas. Schwarzenberggl. (1890), Allalin (1881), Fee supérieur et inférieur (1880), Hochbalm (1883), Balfrin (1883).
Vallée de St-Nicolas. Hochwanggl. (1887), Gabelhorn (1883), Trift (1883), Schallhorn (1878), Bies (1883).
Vallée d'Anniviers. Moming (1886) (?).
Vallée d'Hérens. Pièce (1883), Zigiorenove (1879), Aiguilles rouges (1885).
Val de Bagnes. Breney (1891), Gietroz (1880).
Val d'Entremont. Tseudet, Velan, Valsorey, Maisons-Blanches (avant 1891)
Val Ferret. La Neuvaz (1883), Saleinaz (1889), Orny (1881).
Vallée du Trient. Le Trient (1879), les Petoudes (1884), les Grands (1884), les Fonds (1882).
Tous les autres sont ou stationnaires ou en décrue.

d La sécheresse de l'air augmente l'évaporation, et diminue la condensation ; elle tend à faire baisser le lac, et vice versa.

e Le beau temps, dans les jours précédents, a desséché la terre et a augmenté sa puissance d'absorption des pluies ; la même chute d'eau atmosphérique détermine une plus faible crue des affluents, et le lac aura une tendance à moins élever ses eaux, et vice versa.

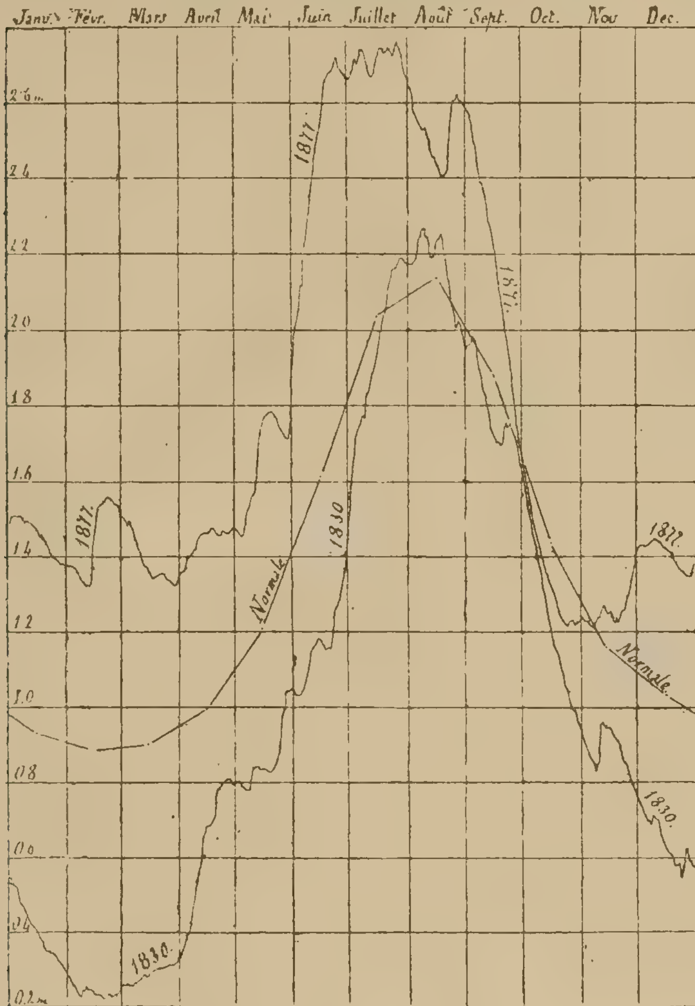
f Les allures de la pluie donneront un afflux plus grand des affluents, si elle se précipite en grande masse et violemment, que si elle tombe plus lentement, en une bruine poussiéreuse, et vice versa.

Je pourrais continuer longtemps cette analyse des effets variables sur la hauteur du lac des divers facteurs météorologiques, chaleur, humidité, vents, insolation, etc. Ces vérités d'évidence n'ont pas besoin d'être développées. Je me bornerai donc à constater qu'au lieu de la courbe adoucie et régulière des moyennes mensuelles, la courbe limnimétrique réelle de chaque année présente des irrégularités accidentelles qui, temporairement, la relèvent ou la font tomber au-dessus ou au-dessous de la normale. La courbe limnimétrique de chaque année est caractérisée par des traits propres qui la distinguent de toutes les courbes antérieures ou postérieures ; la même courbe limnimétrique ne se répète pas deux fois, identiquement sur le même tracé. Pour donner une idée des allures de ces courbes, j'ai représenté dans la figure 42, la courbe de l'année 1830, l'une des années où les eaux du Léman ont été le plus basses, et celle de l'année 1877, l'une des années avec les plus hautes eaux connues. Je n'analyserai pas les détails de ces courbes, qui sont suffisamment parlants.

J'ai décrit, page 516, le procédé très pratique que j'emploie pour apprécier numériquement le caractère limnimétrique d'une année ; je compte le nombre des jours pendant lesquels le lac se tient aux divers degrés des eaux basses, moyennes et hautes. Je me borne à donner ici comme exemples les chiffres d'une année à eaux remarquablement élevées, 1877, et d'une année à eaux remarquablement basses. En même temps, comme termes de comparaison, je réunis ensemble les moyennes des chiffres d'une série d'années à eaux très élevées, [1] 1871-1879, et celles d'une série d'années à eaux relativement peu élevées ; enfin, je donne les chiffres analogues des deux années 1890 et

(1) L'année 1874, au milieu de cette série, a eu cependant des eaux relativement assez basses : pendant 92 jours le lac s'est maintenu à des cotes inférieures à 1.0^{m} ; c'est ce qui explique le chiffre assez fort, 18, pour les très basses eaux de la série.

1891 pendant lesquelles on a commencé à mettre en application le nouveau régime du lac. La comparaison de ces valeurs est d'un intérêt évident. Je le répète, ces chiffres représentent le nombre de jours



(Fig. 42.) Courbes limnimétriques d'une année de hautes eaux, 1877, et d'une année de basses eaux, 1830, comparées à la normale.
Echelle : 1 mm. = 2 cm. de hauteur d'eau.

de l'année pendant lesquels le niveau du lac est resté entre les cotes indiquées en première colonne.

Cotes	Degrés	Ancien régime				Nouveau régime
		Années isolées		Séries d'années		
		1877	*1830*	*1871-79*	*1880-83*	*1890-91*
2.5m à 3.0m	Très hautes eaux	71	—	29	2	—
2.0 à 2.5	Hautes eaux	40	44	70	43	3
1.5 à 2.0	Eaux moyennes	63	49	96	147	234
1.0 à 1.5	Basses eaux	191	60	152	163	128
0.5 à 1.0	Très basses eaux	—	118	18	10	—
0.0 à 0.5	Eaux extraord^t basses	—	94	—	—	—

La hauteur du lac varie d'un jour à l'autre.

La variation minimale est égale à zéro. Mais le cas est rare. J'ai compté, sur les tableaux des années 1878 à 1883, publiés par M. Ph. Plantamour, qui mesure la hauteur du lac de 9h à 3h du jour par une intégration planimétrique des courbes de son limnographe de Sécheron, le nombre des cas où le même chiffre est inscrit deux jours de suite. J'en ai trouvé 50 exemples en 6 ans, soit environ 8 par an; 3 fois seulement, en six ans, le même chiffre était donné trois jours de suite ; la variation d'un jour à l'autre, mesurée au millimètre, peut être donc nulle, mais c'est extrêmement rare.

La variation maximale d'un jour à l'autre est un fait intéressant; elle donne une idée de l'apport d'eau des affluents ; multipliée par la superficie du lac, la hauteur de la crue ou de la décrue indique l'excès du débit des affluents sur celui de l'émissaire ou vice-versa.

Variation en crue. Quelle est la valeur maximale de la crue du lac en 24 heures ? Si je me borne à faire la différence entre les lectures journalières des limnimètres, je m'expose à des causes graves d'erreur, provenant soit des fautes d'observation, soit des seiches, soit des dénivellations accidentelles. C'est ainsi que le chiffre de 240mm, attribué par M. R. Lauterburg (1) à la crue du 1er au 2 novembre 1870, et admis par lui, comme valeur maximale de la crue du Léman, repose sur une erreur manifeste. (2) Pour éviter ces écarts, dans les anciennes ob-

(1) *R. Lauterburg* [loc. cit. p. 361] tableau de la page 34.

(2) Le limnimètre de Genève donnait pour ce jour-là une crue de 22cm, tandis que ceux du Grand-lac n'en marquaient que de 4cm. Le limnimètre à flotteur de Vevey indiquait, le 31 octobre, une crue de 39mm, le 1er novembre 51mm, le 2 novembre 39mm. (Voir *F.-A. Forel.* Limnimétrie du Léman I 1. p. 8. Bull. S. V. S. N. XIV. 596).

servations, j'ai jugé nécessaire de prendre la moyenne de la crue pendant trois jours consécutifs, ou plus; les irrégularités accidentelles disparaissent par ce procédé. C'est ainsi qu'en faisant le relevé des observations du limnimètre à flotteur de Vevey, de 1847 à 1875, j'ai trouvé comme valeurs maximales des fortes crues en 24 heures :

du 31 juillet au 4 août 1851	64mm
du 18 au 21 août 1852	65
du 11 au 17 juin 1855	66
du 18 au 20 mai 1875	73
du 13 au 14 février 1877	74
du 9 au 12 novembre 1875	80
du 28 mai au 1er juin 1856	82

De ces chiffres, on peut déjà conclure que les fortes crues du Léman élèvent les eaux au moins de 8 à 9cm en 24 heures.

Depuis que nous avons des limnographes qui enregistrent, en courbe continue, la hauteur du lac, nous pouvons échapper aux erreurs de lecture et aux erreurs, tout aussi graves, dues aux seiches. Il ne nous reste plus en fait de cause d'incertitude que les dénivellations locales, mais nous pouvons y obvier, lorsque cela est à craindre, en comparant les tracés des limnographes de deux stations différentes. J'ai profité de ces meilleures conditions d'étude pour rechercher sur les tracés de Morges 1876 à 1880, et de Sécheron 1881 à 1891, les variations dépassant 8cm par jour, et j'y ai trouvé les faits suivants :

Crue du 30 — 31	mai	1877	95mm
24 — 25	mai	1878	155
23 — 24	octobre	1880	106
27 — 28	août	1881	86
26 — 27	novembre	1882	102
26 — 27	décembre	—	96
27 — 28	—	—	106
16 — 17	juin	1887	101
10 — 11	décembre	—	91
1 — 2	août	1888	101
2 — 3	octobre	—	208
3 — 4	—	—	168
14 — 15	juin	1889	153
9 — 10	octobre	—	95

Ainsi donc une variation dépassant 10cm par jour s'est reproduite

8 fois dans ces 16 années; une variation dépassant 15cm s'est présentée 4 fois; une seule fois, la variation a dépassé 20cm. Je vais analyser ces cas très intéressants des plus fortes crues du lac.

Crue du 25 mai 1878. Sous l'action des orages, du föhn et de la pluie, le lac est monté d'une manière tout à fait insolite. L'orage a commencé le 24 mai à 5h du soir. La pluie a été fort violente, ainsi que le prouvent les mesures pluviométriques des 24 et 25 mai qui donnent

à Genève	57.1mm	d'eau
à Lausanne	73.8	—
au Grand St-Bernard	44.3	—
à Græchen	48.8	—

D'après les tracés du limnographe de Morges, le lac est monté de 155mm, du 24 mai à 5 1/2h s au 25 mai à la même heure; la crue a continué jusqu'au 26 mai à 10h s donnant une hauteur totale de 203mm.

Que nous n'avons pas eu affaire à une dénivellation locale, cela est prouvé par la comparaison avec les tracés du limnographe de Sécheron. M. Ph. Plantamour a obtenu pour ces jours les hauteurs suivantes du lac, entre 9h m et 3h s.

24 mai	1.952m		
25 —	2.076	crue en 24 heures	124mm
26 —	2.146	—	70
		crue totale	194mm

Nous pouvons donc accepter comme valable la crue donnée par le limnographe de Morges de 155mm en 24 heures. Les barrages de Genève étaient entièrement ouverts; le débit de l'émissaire n'était entravé par aucune manœuvre extraordinaire. Cette crue, la plus forte qu'ait enregistré l'histoire du lac avant le nouveau régime, est due simplement à l'excès d'entrée de l'eau par les affluents débordés.

Nous avons tiré des valeurs de cette crue le débit des affluents du lac, et l'avons évalué à un total de 1475m3 sec (voir page 362).

Crue du 3 octobre 1888. Nous avons cependant une crue, plus forte encore, du lac, le 2-3 octobre 1888, qui a dépassé notablement celle du 24-25 mai 1878. Mais les conditions n'étaient plus aussi simples; la fermeture du barrage de Genève est intervenue et a certainement aggravé, et de beaucoup, la hausse extraordinaire du lac.

Le 2 octobre 1888 vers 2h s, un orage de pluie, sans manifestations

électriques, sans grand vent, mais avec pluie diluvienne, a éclaté sur le bassin du Léman et de ses affluents directs, et y a versé une masse considérable d'eau; la pluie ayant duré 24 heures et cessé le lendemain à peu près à la même heure qu'elle avait débuté, nous pouvons compter pour la chute des 24 heures la somme des lectures pluviométriques des deux journées consécutives; cela nous donne les chiffres que nous avons résumés page 296, soit en moyenne:

Sur la côte suisse du Léman	122.8^{mm} d'eau.
— savoyarde	164.0 —
Sur le lac et le bassin des affluents directs	143.4 —

La pluie a été localisée sur la plaine suisse, le Jura et les Préalpes suisses et savoyardes; le Valais a presque entièrement échappé à l'orage.

Sous l'action de cette pluie d'intensité excessive, le lac a subi une crue considérable; elle est constatée par toutes les observations faites à tous les limnimètres du lac. Voici les chiffres du limnographe de Sécheron d'une part, et la moyenne des chiffres des limnimètres de Vevey, Ouchy, Morges, Rolle, Nyon, Coppet.

	Limnimètres vaudois.	Limnographe de Sécheron.
1 octobre	1.671^{m}	1.652^{m}
2 —	1.680	1.698
3 —	1.915	1.901
4 —	2.044	2.064

Si j'analyse les tracés du limnographe de Thonon, je trouve les allures de la crue et j'en détermine la valeur horaire:

				Valeur horaire de la crue.
du 2 oct.	2^{h} s	au 2 oct.	8^{h} s	8.0^{mm}
—	8^{h} s	3 —	10^{h} m	8.8
3 —	10^{h} m	3 —	4^{h} s	13.0
—	4^{h} s	—	10^{h} s	8.0
—	10^{h} s	4 —	6^{h} m	4.2

De ces chiffres on voit qu'au moment de la hausse la plus rapide du lac, la crue a eu une valeur moyenne de 13^{mm} par heure et cela pendant 6 heures de suite, ce qui exclut l'idée d'une dénivellation locale.

Si nous cherchons sur les tracés limnographiques la crue la plus forte en 24 heures, nous trouvons:

tracé de Thonon, du 2 au 3 octobre à 6^{hs} 238mm
tracé de Sécheron, 3 au 4 — à 2^{hm} 254

Le chiffre de Genève est le plus élevé; mais de fortes seiches ayant compliqué la lecture des tracés, je préfère m'en tenir au chiffre du limnographe de Thonon.(1)

La hauteur totale de la crue du 2 au 4 octobre a été

d'après les limnimètres du Grand-lac	364mm
— le limnographe de Sécheron	371
moyenne	368mm
dont la moitié représente la crue en 24 heures	184mm

C'est incontestablement la plus forte crue historique du Léman.

Cette hausse extraordinaire du lac doit être attribuée en partie, mais seulement en faible partie, à la fermeture des barrages de Genève. En effet, l'Arve avait subi l'action du même orage, et s'était mise en crue d'inondation, dépassant la hauteur des plus hautes eaux des trente dernières années. A la Jonction, au confluent du Rhône et de l'Arve, les eaux atteignaient la cote RPN — 2.03m soit ZL + 0.97m; c'est-à-dire qu'elles étaient plus élevées que les eaux d'hiver du lac ne l'étaient souvent dans les époques anciennes. Si le lac avait été à ces cotes inférieures, on aurait pu voir se renouveler, ce jour-là, le phénomène historique de l'entrée de l'Arve dans le Léman, dont nous avons parlé, page 395. Le lac étant le 2 octobre à la cote 1.69m, cette éventualité n'était pas à craindre. Mais la crue de l'Arve était menaçante à deux autres points de vue. D'une part les rives du Rhône en aval de Genève étaient inondées; la ville de Seyssel, en particulier, poussait des cris d'alarme, et les devoirs de bon voisinage exigeaient une intervention, si intervention était possible. D'autre part, les hautes eaux de l'Arve faisaient refluer l'eau dans le bief aval de la machine hydraulique de Genève, et diminuaient tellement la chute motrice, en la réduisant à 0.9m, que le jeu des turbines était arrêté, et l'alimentation industrielle et hygiénique de Genève était supprimée. Dans ces conditions, la direction des eaux de la ville a cru pouvoir prendre sur elle de fermer le barrage à rideaux; en limitant le débit du Rhône, elle diminuait d'autant la quantité d'eau qui inondait Seyssel et les villages

(1) Ce tracé a été interrompu dans la nuit du 2 au 3 octobre de 9^{hs} à 10^{hm}, la crue trop rapide ayant fait sortir le crayon hors du papier enregistreur. Mais cela ne nous arrête pas pour fixer exactement les heures de la crue maximale qui a commencé avant cet accident.

riverains du fleuve; en arrêtant l'eau dans le bras droit du fleuve, elle relevait l'eau dans le bras gauche, et augmentait un peu la force motrice utilisable. Le barrage à rideaux a été fermé le 2 octobre à $8^{h\,s}$ et ouvert seulement le 4 octobre à $8^{h\,m}$. Pendant ce temps, l'eau s'écoulait encore par les vannes de 6 turbines et par quelques orifices accessoires. Voici les valeurs du débit de l'émissaire dans ces journées critiques; je les dois à M. l'ingénieur C. Butticaz, directeur des Eaux de Genève.

1 octobre	7^h matin	$223^{m3\,sec}$
2 —	7 —	222
3 —	7 —	108
3 —	4 soir	92
4 —	7 matin	139
4 —	9 —	392
5 —	6 soir	460

D'après ces chiffres, après la fermeture du barrage à rideaux, le débit du Rhône qui était avant la crue de $220^{m3\,sec}$, est tombé à $100^{m3\,sec}$ environ, pour se relever à 400 et $460^{m3\,sec}$ lorsque les barrages ont été de nouveau ouverts. On peut donc dire que si le barrage était resté ouvert pendant la crue, il y aurait eu(1) le 3 octobre, un débit de 250 à $300^{m3\,sec}$ plus élevé que celui qu'a présenté l'émissaire du lac. De ce fait la crue du lac aurait été diminuée de 37 à 45^{mm} en 24 heures. Au lieu d'être de 238^{mm}, elle n'aurait plus été que de 180 à 200^{mm} en 24 heures. C'eût été encore la plus forte crue connue du Léman.

Tenons-nous en aux chiffres observés; nous en tirerons quelques valeurs intéressantes :

1° Etant connue la superficie du Léman de 582.4^{km2}, la crue du 2 au 4 octobre de 368^{mm} représente un volume de 214 $millions^{m3}$ entrés en 2 jours dans le lac en excès de l'eau écoulée par l'émissaire de Genève.

2° La crue du 2 au 3 octobre à $6^{h\,s}$ de 238^{mm} représente un volume de 139 $millions^{m3}$ d'excès d'entrée des affluents, soit un excès de débit des affluents de $1607^{m3\,sec}$. Pendant ce temps, le Rhône de Genève laissait passer encore $100^{m3\,sec}$. Le débit total des affluents dans ces 24 heures était donc en moyenne de $1707^{m3\,sec}$.

3° Nous arrivons à un chiffre plus fort encore si nous prenons les

(1) Nous ne tenons pas compte, il est vrai, du remous des eaux de l'Arve, qui aurait certainement diminué notablement le débit du Rhône.

heures de la crue maximale, le 3 octobre de $10^{h\,m}$ à $4^{h\,s}$ où le lac montait de 13^{mm} par heure. A ce taux, l'excès d'entrée des affluents était de $2103^{m^3 sec}$, et en y ajoutant les 100^{m^3} écoulés par l'émissaire, nous arrivons à un débit total de ces mêmes affluents de $2203^{m^3 sec}$.

4° Ce chiffre de $2203^{m^3 sec}$ représente la somme de trois valeurs: l'eau tombée en pluie sur le lac, l'eau apportée par le Rhône du Valais, l'eau des affluents directs du lac. Essayons de le décomposer.

Le Rhône du Valais n'a subi qu'une crue insensible. D'après les observations fluviométriques de la Porte du Scex que je dois à M. l'ingénieur cantonal de Rivaz, le fleuve ne s'est élevé que de 30 à 35^{cm} au plus; c'est que tout le Valais, en amont de St-Maurice, est resté presque indemne de pluie. Des hauteurs du fleuve, en utilisant le graphique Bürkli-Ziegler (v. p. 360), j'évalue le débit du Rhône du Valais dans la journée du 3 octobre à environ $250^{m3 sec}$.

La pluie tombée sur le lac peut être évaluée. Nous avons comme moyenne des chutes d'eau dans les huit stations riveraines du Léman dans la journée du 2-3 octobre, 143.1^{mm}, soit par heure 60^{mm} d'eau. Une couche de 60^{mm} sur la superficie du Léman représente 35 millions^{m3} soit une chute de $970^{m3 sec}$.

Dans les heures de plus forte crue, le 3 octobre 1888, alors que le lac montait à raison de 13^{mm} par heure, le débit des affluents se décomposait donc comme suit :

Pluie tombée sur le lac	$970^{m3 sec}$
Rhône du Valais	250
Affluents directs du lac	983
total	$2203^{m3 sec}$

Etant données les circonstances de l'orage du 2-3 octobre, ce chiffre de $983^{m3 sec}$ pour le débit total des petits affluents du lac doit être considéré comme étant très près du maximum possible. Tous les affluents étaient simultanément enflés; ce n'est pas à dire que chacun d'eux, pris isolément, ne puisse présenter de crue de débordement supérieure à celle de ce jour-là. Mais comme effet d'ensemble, il sera rarement dépassé.

5° Nous pouvons tirer encore de ces chiffres une notion intéressante sur le pouvoir de retenue de la terre en cas de pluie diluvienne. Nous savons qu'il est tombé dans la journée en question en moyenne 122.8^{mm} d'eau sur la partie suisse du bassin des affluents directs du Léman, partie qui mesure 1173^{km2}; il est tombé 164.0^{mm} d'eau sur la

partie savoyarde, de 861$^{km^2}$. En multipliant ces chiffres, nous arrivons à une chute d'eau de

Sur le bassin suisse		144 millions$^{m^3}$
—	savoyard	141 —
	ensemble	285 millions$^{m^3}$

soit par seconde 3304$^{m^3}$. Or nous savons qu'au moment de la plus forte crue du lac les affluents directs du Léman apportaient un volume de 983$^{m^3\ sec}$ seulement. Ce dernier chiffre n'est que le 29 $^0/_0$, soit moins d'un tiers, du total de 3304$^{m^3\ sec}$ d'eau tombée sur le bassin ; le reste, soit 71 $^0/_0$, plus des deux tiers, s'arrêtait dans le sol pour s'y infiltrer et pour s'écouler lentement, plus tard.

La crue du 14-15 juin 1889 a fait monter le lac, d'après les tracés de Sécheron, de 153^{mm} en un jour ; (¹) elle est donc la troisième des grandes crues du lac. La chute de pluie qui l'a occasionnée, orage de pluie, sans phénomènes électriques, a été forte, mais n'a pas atteint l'intensité de celle du mois d'octobre précédent ; on signale des valeurs pluviométriques de 91^{mm} à Lausanne, 86 à Morges, 83 à Cossonay, 75 à Gimel, 73 à Cully, etc. Les autres stations descendent à 60, 50, 40^{mm}. L'Arve a subi en même temps une forte crue, et la ville de Seyssel, craignant une catastrophe, a fait demander par télégraphe la fermeture du lac. La ville de Genève a cru devoir obtempérer à ce désir, et la crue du lac a été, de ce fait, considérablement exagérée dans sa rapidité et son amplitude. D'après les calculs de M. Th. Turrettini, l'apport total des affluents a été dans cette journée de 1330$^{m^3\ sec}$. (²)

De ces exemples je conclus :

a Les plus fortes crues du Léman, sans l'intervention des barrages de Genève, atteignent le taux de 15^{cm} en 24 heures (25 mai 1878).

b La fermeture des barrages de Genève exagère notablement l'amplitude et la rapidité des crues (2-4 octobre 1888, 15 juin 1889).

c La plus forte crue historique du Léman a été celle du 2-4 octobre 1888, à raison de 368^{mm} en deux jours, de 238^{mm} en 24 heures, de 13^{mm} par heure au moment de la hausse la plus rapide.

Variation en décrue. La décrue du lac est beaucoup plus régulière que la crue ; elle est fonction de la hauteur du lac et de l'état d'ou-

(¹) Au limnographe de Thonon, la crue du 14 au 15 juin, à midi, a été de 148^{mm}.
(²) Archives, Genève. XXIII. 163. 1890.

verture de l'émissaire. C'est au commencement de l'automne, les affluents commençant à se réduire (si le temps est sec et froid), et le débit de l'émissaire étant encore considérable, vu le niveau encore élevé du lac, que la décrue est la plus forte. Voici les allures de cette décrue, dans son moment de plus belle régularité, pendant 5 années consécutives.

					Décrue totale.	Décrue journalière.
1876	du 2	septembre	au 28	septembre	579mm	22mm
1877	3	—	17	octobre	1255	28
1878	3	—	8	—	984	28
1879	11	—	15	—	957	28
1880	20	—	6	—	341	21

Quelle est la valeur maximale de la décrue du lac en un jour? Si, pour éviter l'action disturbante des dénivellations locales, je prends la moyenne des hauteurs lues sur les tracés des deux limnographes de Morges et de Sécheron, je trouve pour la plus forte décrue de l'automne :

1876	du 6 au 7	septembre	41mm
1877	6 — 7	—	40
1878	22 — 23	—	41
1879	12 — 13	—	42
1880	29 — 30	—	33

Le maximum de décrue, dans ces 5 années d'observation, a donc été de 42mm en 24 heures. Cette valeur correspond à un excès de débit de l'émissaire de $283^{m^3 sec}$.

LES EAUX MOYENNES DU LÉMAN

Quelle est la cote des eaux moyennes du lac? Cette valeur est nécessaire au géographe qui veut déterminer l'altitude de la nappe du Léman.

Du fait que nous avons reconnu des variations séculaires dans la hauteur des eaux, il résulte que nous devons préciser les conditions et l'époque pour lesquelles nous voulons faire cette détermination. Nous distinguerons donc :

1° Régime ancien du lac, avant 1883. Régime semi-naturel, altéré cependant par l'action toujours plus prononcée des barrages de

l'émissaire. Pour ces époques anciennes, nous prendrons simplement la moyenne des moyennes annuelles, et nous dirons en nombre rond :

de 1818 à 1840	eaux moyennes	ZL + 1.16m
de 1840 à 1883	»	ZL + 1.47

ou si nous embrassons la période entière :

de 1818 à 1883	eaux moyennes	ZL + 1.36m

Je mettrai en regard de ce dernier chiffre, que nous adopterons, ceux qui ont été acceptés par d'autres auteurs.

Général Dufour. Carte suisse au 1 : 100 000e	ZL + 1.39m
F. Burnier. 1854	ZL + 1.31
Colonel Siegfried. Atlas Siegfried	ZL + 1.44

2° Régime nouveau du Léman. Depuis la régularisation du régime du lac, nous avons à faire à un niveau artificiel ; suivant les conditions météorologiques de l'année, et suivant les intérêts hydrauliques de Genève, la moyenne annuelle sera maintenue plus ou moins élevée. Dans ces circonstances, il me paraît le plus logique de définir le niveau moyen du Léman, comme étant la hauteur moyenne entre les deux extrêmes conventionnels.

D'après la convention du 14 décembre 1884 :

le maximum normal est à la cote	ZL + 1.7m
le minimum » » »	ZL + 1.1m
La hauteur moyenne est donc	ZL + 1.4m

ou RPN — 1.6m. Ce qui, avec l'altitude moderne du repère de la Pierre du Niton 373.5m, donne pour l'altitude de la nappe du Léman 371.9m au-dessus de l'Océan.

FIN DU TOME PREMIER

TABLE DES MATIÈRES

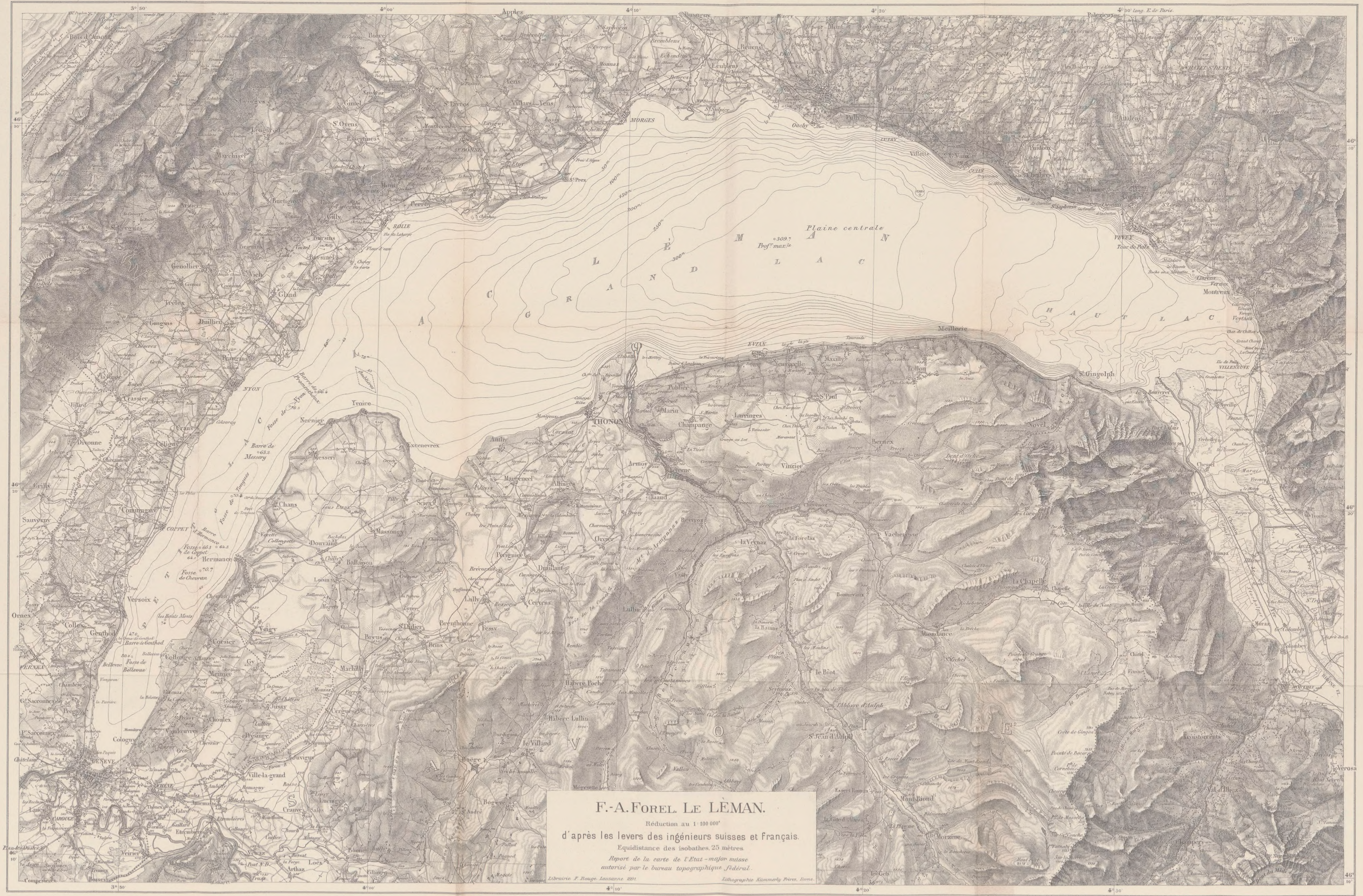
CONTENUES DANS LE PREMIER VOLUME.

TROISIÈME PARTIE. — **GÉOLOGIE**.

QUATRIÈME PARTIE. — **CLIMATOLOGIE**.

CINQUIÈME PARTIE. — HYDROLOGIE.





Echelle - 1: 100000.